

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

VLIV UPS NA HARMONICKÉ V NAPÁJENÉ SÍTI TELEFONNÍ
ÚSTŘEDNY DOLŮ BÍLINA
EFFECT OF UPS ON THE HARMONICS IN POWERED NETWORK OF
PHONE SYSTÉM BÍLINA MINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Zelenka**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Vliv UPS na harmonické v napájené síti telefonní ústředny Dolů Bílina**
Effect of UPS on the Harmonics in Powered Network of Phone System
Bílina Mines

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor problematiky harmonických v elektrických sítích
2. Popis napájecí sítě telefonní ústředny Dolů Bílina
3. Vliv UPS na harmonické v napájecí síti telefonní ústředny
4. Technická opatření pro snížení harmonických
5. Ekonomické zhodnocení navržených variant

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Santarius P.: Elektromagnetická kompatibilita, Učební texty VŠB-TUO, Ostrava, 2007
2. Normy ČSN
3. Další literatura podle pokynu vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Duchcově, dne 30.4.2014



Bc. Zelenka Jan

Poděkování:

„Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Petru Krejčímu, Ph.D., za odbornou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracovávání této diplomové práce.“

„Dále bych chtěl velice poděkovat kolegovi Bc. Radku Benešovi, za pomoc s měřením napájecí sítě telefonní ústředny na Dolech Bílina.“

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá problematikou rušení napájecích sítí nelineárními spotřebiči, respektive rušením napájecí sítě záložními systémy UPS v napájecí síti telefonní ústředny Severočeských dolů, lokalita Bílina.

První část práce je věnována všeobecnému popisu problematiky elektromagnetické kompatibility a harmonickým v elektrických sítích. Jsou zde popsány příčiny vzniku rušení, vliv těchto rušení na zařízení, napájecí síť a možné způsoby omezování rušení.

Další části práce již řeší problematiku rušení vznikající v napájecí síti telefonní ústředny Dolů Bílina a návrh technických opatření na snížení rušení. Je zde popsána zmíněná napájecí síť s následným rozbořem výsledků měření harmonických vyšších řádů a popsány zpětné vlivy nelineárních spotřebičů na tuto napájecí síť. Řešen je i praktický návrh odrušovacího filtru s měřením napájecí sítě po jeho aplikaci.

Poslední část se již zabývá ekonomickou stránkou možných způsobů odrušování napájecí sítě telefonní ústředny.

Klíčová slova:

Telefonní ústředna, napájecí síť, UPS, rušení, harmonické, filtr, obvody, elektronické zařízení, měření, frekvence, elektromagnetická kompatibilita, systém.

Abstract:

The topic of this diploma thesis is as follows problems caused by interruptions to supply networks by nonlinear devices, in other words it deals with interruptions to supply networks caused by UPS backup systems of the telephone exchange, Severoceske Doly, located in Bilina.

First part is devoted to a general description of electromagnetic compatibility issues and harmonic ones within electrical networks. Here we have a description of causes of the interruptions, the impact of these interruptions to the equipment, supply network and possible ways to reduce these interruptions.

Other part of this work already solves the interruption issues that originate in the supply network of the Doly Bilina telephone exchange. It suggests several technical measures to reduce the interruptions. It also includes a description of already mentioned supply network followed by an analysis of results that came from measuring harmonic higher orders. It also describes retroactive effects of nonlinear devices on this supply network. Here we also deal with a practical design of a suppression filter with a measuring of the supply network after its use.

The last part already deals with the economic aspects of possible techniques that can reduce interruptions to the telephone exchange supply network.

Keywords:

Telephone Exchange, supply network, UPS, interruptions, harmonic, filter, circuit, electronic device, measuring, frequency, electromagnetic compatibility, system

Seznam použitých symbolů a zkratek:

AC	Alternating Current
CE	Communauté Européenne (Evropské společenství)
CISPR	Comité international spécial des perturbations radioélectriques (Mezinárodní výbor pro studium rušení rádiového příjmu)
ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma
DB	Doly Bílina
DC	Direct Current
EMC	Electromagnetic Compatibility (elektromagnetická kompatibilita)
EMI	Electromagnetic Interference (elektromagnetické rušení)
EMS	Electromagnetic Susceptibility (elektromagnetická imunita)
EN	Evropská norma
ES	Evropské společenství
EU	Evropská unie
GE	General Electronic
HDO	Hromadné dálkové ovládání
HP	Hewlett Packard
IP	Internet Protocol
ICT	Information and Communication Technology
IEC	International Electrotechnical Commission (mezinárodní úřad pro elektrotechniku)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LC	Indukčnost - kapacita
LCD	Liquid Crystal Display
LIM	Line Interface Module
MRS	Modular Rack System
NV	Nařízení vlády
PC	Personal Computer
PCM	Pulse Code Modulation
PFC	Power Factor Correction
RLC	Odpor – indukčnost - kapacita
SD	Severočeské doly
THD	Total Harmonic Distortion
THDI	Total Harmonic Distortion of Current
THDU	Total Harmonic Distortion of Voltage
TR	Transformátorovna
TÚ	Telefonní ústředna
VKV	Very High Frequency
UPS	Uninterruptible Power Supply (nepřerušitelný zdroj napájení)
vf	Vysokofrekvenční
VFD	Voltage and Frequency dependent
VFI	Voltage and Frequency independent
VI	Voltage Interactive
A	Amper, jednotka soustavy SI, jednotka elektrického proudu (A)
Ah	Amperhodina, jednotka elektrického náboje, 1 Ah=3600 coulombů
F	Farad, jednotka soustavy SI, jednotka elektrické kapacity (F)
G	Giga, předpona jednotek SI (10^9)
H	Henry, odvozená jednotka soustavy SI, jednotka indukčnosti (H)
Hz	Hertz, odvozená jednotka soustavy SI, jednotka frekvence (Hz)
M	Mega, předpona jednotek SI (10^6)
V	Volt, odvozená jednotka soustavy SI, jednotka elektrického napětí (V)

VA	Voltampér, jednotka zdánlivého elektrického výkonu (VA)
Var	Var, jednotka jalového výkonu (Var)
W	Watt, odvozená jednotka SI, jednotka elektrického výkonu (W)
$\cos \varphi$	Účinník, poměr činného a zdánlivého výkonu (bezrozměrné)
dB	Decibel, vedlejší jednotka SI, poměrná jednotka logaritmická (dB)
k	Kilo, předpona jednotek SI (10^3)
m	Mili, předpona jednotek SI (10^{-3})
$\sqrt{}$	Odmocnina, matematický symbol
%	Procento, matematický symbol
Ω	Ohm, odvozená jednotka SI, jednotka elektrického odporu (Ω)
Π	Pí, řecké písmeno, matematická konstanta (3,1415926535897932384)
Σ	Suma, řecké písmeno, výsledný součet (dle využití)

Seznam obrázků:

<i>Obr. 1) základní řetězec EMC s příklady jednotlivých oblastí.....</i>	<i>2</i>
<i>Obr. 2) definice úrovní, mezi vyzařování a odolnosti.....</i>	<i>5</i>
<i>Obr. 3) diagram složek výkonů pro neharmonické průběhy.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4) sinusový průběh základní, třetí a páté harmonické.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 5) sinusový průběh základní, třetí a páté harmonické s nesinusovým průběhem</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 6) časový průběh napětí a proudu lineární zátěží.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 7) časový průběh napětí a proudu nelineární zátěží.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 8) spektrum harmonických běžného spínaného zdroje (PC zdroj).....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 9) spektrum harmonických běžného kompaktního svítidla (zářivkové svítidlo).....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 10) spektrum harmonických šestipulzního můstku.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 11) zkrácení vlivem nelineární zátěže.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 12) sčítání třetích harmonických a jejich násobků ve středním vodiči.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 13) zapojení odrušovací tlumivky a průběh vložného útlumu tlumivky.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 14) náhradní schéma reálné odrušovací tlumivky.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 15) kmitočtová závislost odrušovací tlumivky.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 16) zapojení odrušovacího kondenzátoru a průběh vložného útlumu tlumivky.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 17) vliv délky přívodů dvojpólového kondenzátoru 250 nF na vložný útlum.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 18) zapojení odrušovacího filtru jako lineárního dvojhranu.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 19) základní zapojení půlčlánku L – dolní propust.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 20) zapojení článků T a Π.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 21) zapojení dvojitých článků T a Π.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 22) vložný útlum základních článků T a Π.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 23) sériový rezonanční obvod.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 24) příklad filtračně kompenzačního filtru.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 25) kmitočtová charakteristika kompenzačního filtru.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 26) impedanční charakteristika kompenzačního filtru pro 3. a 5. harmonickou.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 27) paralelní aktivní filtr a jeho připojení do sítě.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 28) sériový aktivní filtr a jeho připojení do sítě.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 29) kombinovaný aktivní filtr a jeho připojení do sítě.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 30) blokové schéma UPS pro režim OFF-line.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 31) blokové schéma UPS pro režim LINE-interactive.....</i>	<i>47</i>

Obr. 32) blokové schéma UPS pro režim ON-line	48
Obr. 33) příklad zapojení filtru pro odrušení frekvenčních měničů	52
Obr. 34) průchodkový kondenzátor	53
Obr. 35) poškození elektrolytických kondenzátorů zdrojů PC a monitorů	54
Obr. 36) detail deformace pouzdra kondenzátoru	54
Obr. 37) měřicí přístroj Chauvin Arnoux, C.A 8352 Power Quality Monitor	55
Obr. 38) spektrální analýza harmonických proudů na fázi L1	57
Obr. 39) spektrální analýza harmonických napětí na fázi L1	57
Obr. 40) spektrální analýza harmonických proudů na fázi L2	58
Obr. 41) spektrální analýza harmonických napětí na fázi L2	58
Obr. 42) spektrální analýza harmonických proudů na fázi L3	59
Obr. 43) spektrální analýza harmonických napětí na fázi L3	59
Obr. 44) spektrální analýza harmonických proudů sítě TÚ při běžném zatížení	60
Obr. 45) spektrální analýza harmonických proudů – zátěž žárovky, $P_N = 400\text{ W}$	61
Obr. 46) spektrální analýza harmonických napětí – zátěž žárovky, $P_N = 400\text{ W}$	61
Obr. 47) spektrální analýza harmonických proudů – UPS APC CS500 bez zátěže	62
Obr. 48) spektrální analýza harmonických napětí – UPS APC CS500 bez zátěže	62
Obr. 49) spektrální analýza harmonických proudů – UPS APC CS500, zátěž PC+mon... 63	
Obr. 50) spektrální analýza harmonických napětí – UPS APC CS500, zátěží PC+mon... 63	
Obr. 51) vývojový diagram návrhu filtru	66
Obr. 52) dvojitý článek II	69
Obr. 53) schéma zapojení navrženého pasivního filtračně kompenzačního filtru	71
Obr. 54) prototyp navrženého filtru	76
Obr. 55) změřená frekvenční charakteristika navrženého filtru	77
Obr. 56) spektrální analýza harmonických proudů pro UPS bez filtru, UPS s filtrem při zapnutí 3., 5., 7. sekce filtru a UPS s filtrem při zapnutí veškerých sekcí filtru... 79	
Obr. 57) zobrazení harmonických proudů na UPS	80
Obr. 58) spektrální analýza harmonických napětí pro UPS bez filtru, UPS s filtrem při zapnutí 3., 5., 7. sekce filtru a UPS s filtrem při zapnutí veškerých sekcí filtru... 81	
Obr. 59) zobrazení harmonických napětí na UPS	82

Seznam tabulek:

<i>Tab. 1) zatížení jednotlivých fází systému UPS v objektu TÚ DB.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 2) změřené hodnoty $\cos \varphi$.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 3) hodnoty harmonických proudů na UPS (přepočteno k základní harmonické).....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 4) hodnoty harmonických napětí na UPS (přepočteno k základní harmonické).....</i>	<i>82</i>

Obsah:

1. Úvod.....	1
2. Rozbor problematiky harmonických v elektrických sítích a EMC napájecích sítí	2
2.1. EMC, předpisy a normy.....	2
2.2. Typy vzájemných vazeb elektrických obvodů.....	7
2.3. EMC elektrotechnických obvodů.....	9
2.3.1. EMC výkonových polovodičových obvodů.....	11
2.3.2. EMC napájecích zdrojů malého výkonu.....	12
2.3.3. EMC nevýkonných elektrických obvodů.....	13
2.3.4 EMC vedení s rozloženými parametry.....	14
2.4. Harmonické v elektrických sítích.....	14
2.4.1. Charakteristika harmonických frekvencí.....	14
2.4.2. Základy generování harmonických.....	17
2.4.3. Elektrická zařízení generující harmonické.....	19
2.4.4. Vliv harmonických na napájecí síť a elektroinstalace.....	22
2.4.5. Způsoby omezování harmonických v elektrických sítích.....	26
2.4.6. Vliv filtrů na signál HDO.....	41
3. Popis napájecí sítě telefonní ústředny Dolů Bílina	42
3.1. Útvar ICT Doly Bílina, oddělení technické podpory.....	42
3.2. Napájecí síť telefonní ústředny Doly Bílina.....	43
3.2.1. Historie.....	43
3.2.2. Současný stav.....	45
4. Vliv UPS na harmonické v napájecí síti telefonní ústředny	46
4.1. Typy UPS zdrojů.....	46
4.2. Vlastnosti UPS zdrojů.....	49
4.3. Odrušovací síťové filtry pro odrušení UPS s frekvenčním měničem.....	51
4.4. Vliv nelineárních spotřebičů na napájecí síť TÚ – harmonické.....	53

5. Technická opatření pro snížení harmonických v napájecí síti TÚ Doly Bílina	55
5.1. Měření napájecí sítě TÚ Doly Bílina.....	55
5.2. Rozbor měření.....	64
5.3. Návrh a výpočet filtru harmonických.....	65
5.4. Měření napájecí sítě TÚ po aplikaci filtru harmonických.....	78
 6. Ekonomické zhodnocení navržených variant.....	84
 7. Závěr.....	86
 Použitá literatura.....	87

1. Úvod

Rozvoj polovodičových elektronických zařízení, která jsou zapojována do rozvodné elektrické sítě, odstartoval v šedesátých letech minulého století vznik novému vědeckému oboru „elektromagnetická kompatibilita“. Tento obor se zabývá slučitelností jednotlivých elektronických systémů a jejich vzájemným působením na pracovní prostředí. Současné rozvodné elektrické sítě jsou ovlivněny mnohem více rušivými vlivy pocházejícími např. z výkonových měničů, výkonových spínačů a relé, motorů, atd. Provoz těchto zařízení s sebou přináší negativní jevy, jako např. přechodné a rezonanční děje, harmonické vyšších řádů, nežádoucí vazby a šumy. Tyto nežádoucí vlivy ovlivňují správnou funkci elektronických, měřicích a vyhodnocovacích zařízení, působí nepříznivě na chod a zatížení elektrické sítě a v konečném důsledku mají vliv na ekonomickou stránku provozu. V některých případech mohou způsobit i zničení celého elektronického systému.

V této diplomové práci se zabývám možným vlivem jednoho druhu nelineárního spotřebiče na napájecí síť objektu telefonní ústředny Severočeských dolů v lokalitě Bílina. Jedná se o komplex několika záložních UPS zapojených v této síti. Jelikož je v posledních čtyřech letech zaznamenáváno v této síti rušení pozorovatelné i bez měřicích přístrojů, byl důraz kladen právě na tyto UPS, které byly v tomto časovém horizontu pořízovány.

První část diplomové práce se zabývá všeobecnou problematikou elektromagnetické kompatibility a harmonickými vyšších řádů v elektrických sítích. Jsou zde uvedeny příčiny vzniku rušení a vliv na ostatní zařízení v síti s možným způsobem omezování těchto negativních vlivů.

Následné dvě kapitoly pojednávají již o napájecí síti objektu telefonní ústředny Dolů Bílina. Zmíněny jsou historie a současný stav využití a zálohování této napájecí sítě, s popisem činností útvaru informačních a komunikačních technologií, ke kterému telefonní ústředna patří. Uvedeny jsou zde různé typy a vlastnosti UPS, spolu s potřebnými parametry odrušovacích filtrů pro tyto záložní systémy. Dále jsou zde popsány vlivy nelineárních spotřebičů na napájecí síť telefonní ústředny Doly Bílina, které jsou v praxi pozorovány.

Praktickou částí se zabývá další kapitola. Pro potřeby určení původu a rozsahu rušení napájecí sítě, bylo provedeno několik měření, které bylo následně vyhodnoceno. Výsledky posloužily pro návrh pasivního odrušovacího filtru. Prototyp filtru byl sestrojen a v této napájecí síti i měřen a testován. Toto měření opět podstoupilo vyhodnocení realizovatelnosti použití sestrojeného filtru.

Následným ekonomickým zhodnocením realizovaného prototypu filtru a dalším návrhem možného řešení odrušení napájecí sítě se zabývá poslední kapitola.

2. Rozbor problematiky harmonických v elektrických sítích a EMC napájecích sítí

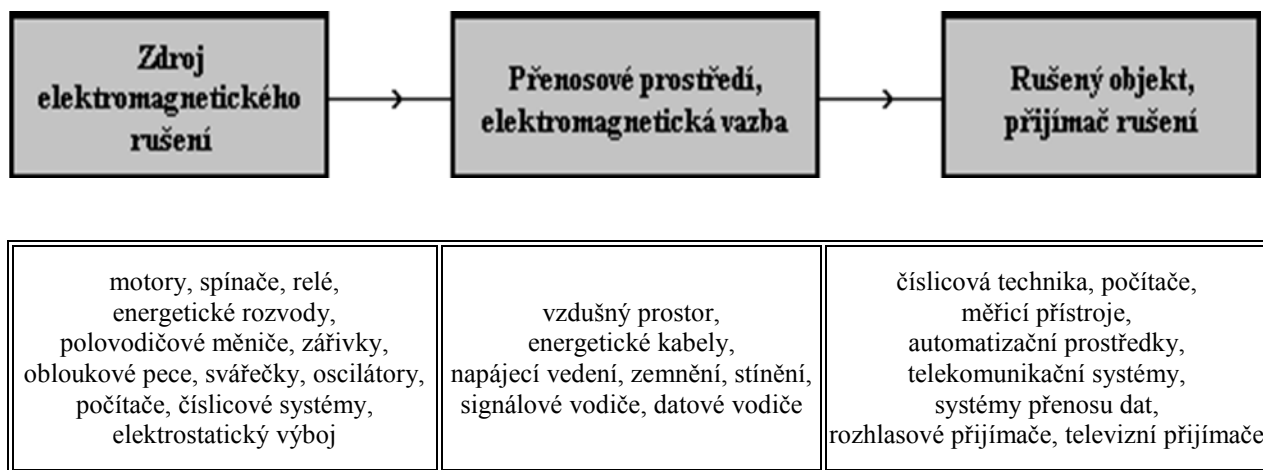
2.1. EMC, předpisy a normy

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) je definována jako schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů a naopak svou vlastní činností nepřipustně neovlivňuje své okolí, tj. nevyzařuje signály, jež by byly rušivé pro jiná zařízení.

EMC vznikla v 60 letech 20. století jako samostatná vědecko-technická disciplína. S prudkým rozvojem elektroniky, zejména mikroprocesorové a komunikační techniky v posledních desetiletích a jejím pronikáním do všech oblastí každodenního života, ztratila EMC svoji exkluzivitu a stále více se dotýká nás všech.

Název elektromagnetická kompatibilita vyjadřuje tedy schopnost současné správné funkce, tj. koexistence zařízení nebo systémů nacházejících se ve společném elektromagnetickém prostředí bez závažného ovlivňování jejich normálních funkcí.

Při zkoumání EMC daného zařízení či systému se vychází vždy z tzv. **základního řetězce EMC**. Tento řetězec zobrazuje systémový charakter problematiky EMC, kdy v obecném případě vždy vyšetřujeme všechny tři jeho složky. [B]



Obr. 1) základní řetězec EMC s příklady jednotlivých oblastí [D]

První oblast **zdrojů elektromagnetického rušení** zahrnuje zkoumání obecných otázek mechanismů vzniku rušení, jeho charakteru a intenzity. Patří sem jednak tzv. přírodní (přirozené) zdroje rušivých signálů (slunce, kosmos, elektrické procesy v atmosféře atd.), jednak tzv. umělé zdroje rušení, tj. zdroje vytvořené lidskou činností, k nimž patří nejrůznější technická zařízení - zapalovací systémy, elektrické motory, výroba, přenos a distribuce elektrické energie, elektronická zařízení, elektronické sdělovací prostředky, tepelné a světelné spotřebiče apod.

Druhá oblast řetězce EMC se zabývá **elektromagnetickým přenosovým prostředím a vazbami**, tedy způsoby i cestami, kterými se energie ze zdroje rušení dostává do rušených objektů - přijímačů rušení.

Konečnou oblastí je problematika **objektů** či **přijímačů rušení** zabývající se klasifikací typů a podrobnou specifikací rušivých účinků na základě analýzy konstrukčních a technologických parametrů zařízení a z toho plynoucí jejich elektromagnetickou odolností.

Skutečná závislost tří oblastí základního řetězce EMC je samozřejmě mnohem složitější, než je znázorněno na obrázku. Každý systém nebo zařízení, může být současně jak vysílačem, tak i přijímačem elektromagnetického rušení. Přesto lze v technické praxi většinou označit element jako zdroj nebo přijímač rušivých signálů.

Problematiku EMC členíme do dvou základních skupin. **Elektromagnetická interference (EMI)**, neboli elektromagnetické rušení je proces, při kterém se signál, generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených systémů. EMI se tedy zabývá především identifikací zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů a identifikací parazitních přenosových cest. Kompatibility celého systému se dosahuje technickými opatřeními především na straně zdrojů rušení a jejich přenosových cest. EMI se tak týká hlavně příčin rušení a jejich odstraňování. Druhou skupinou je **Elektromagnetická susceptibilita** či **imunita (EMS)**, neboli elektromagnetická citlivost či elektromagnetická odolnost vyjadřuje schopnost zařízení pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v prostředí, v němž se vyskytuje elektromagnetické rušení. EMS se tedy zabývá především technickými opatřeními, která zvyšují u objektu (přijímače rušení) jeho elektromagnetickou imunitu, tedy jeho odolnost proti vlivu rušivých signálů. EMS se tak týká spíše odstraňování důsledků rušení, bez odstraňování jejich příčin.

Velmi rozsáhlou a důležitou oblastí je **měření elektromagnetické interference**, především měření rušivých signálů a jejich identifikaci. Zahrnuje měřicí metody a postupy pro kvantitativní hodnocení vybraných parametrů hlavně na rozhraních zdrojů a přijímačů rušení. Problematika měření, která je pro závěrečné posouzení EMC daného zařízení vždy rozhodující, je navíc komplikovaná tím, že i samotné měřicí zařízení je (či může být) zdrojem a současně přijímačem rušivých signálů. Kromě měření rušení se v současné době rychle

rozvíjí i oblast **testování elektromagnetické odolnosti** objektů pomocí tzv. simulátorů rušení (EMC simulátory). Jde tedy v podstatě o praktické ověření stupně EMC navrženého zařízení. Testování se provádí nejen na hotových zařízeních, ale zejména již v průběhu jejich vývoje. [B]

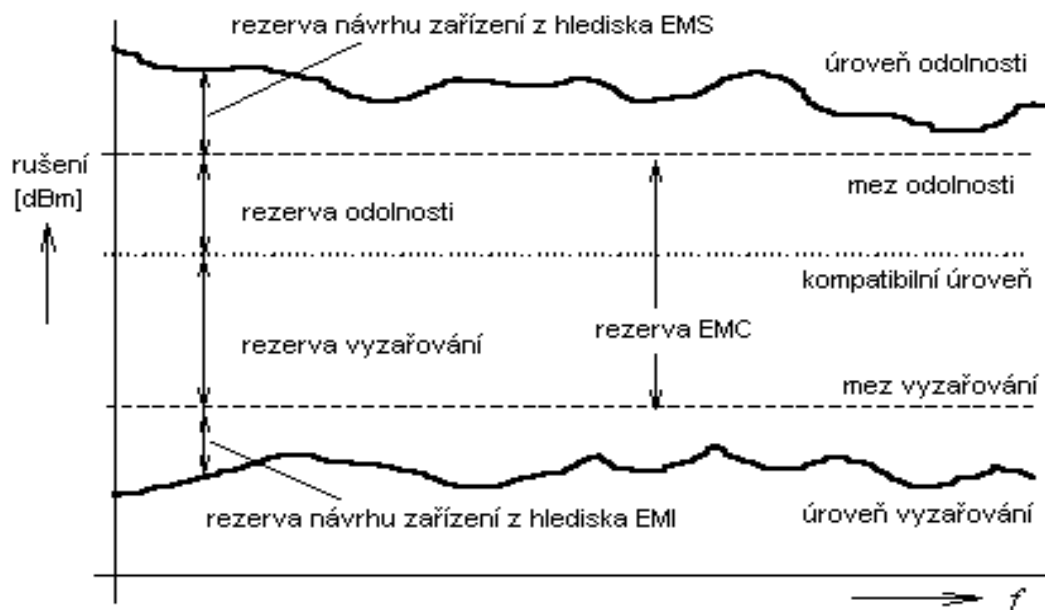
Základní pojmy EMC

Každé elektrotechnické zařízení je současně jak zdrojem elektromagnetického rušení, tak i jeho přijímačem pracujícím v určitém elektromagnetickém prostředí. Pro každé takové zařízení definuje Mezinárodní elektrotechnický slovník ČSN IEC 50 základní pojmy. Níže budou některé základní pojmy vysvětleny.

- **Elektromagnetické prostředí** je tvořeno veškerými elektromagnetickými jevy pozorovatelnými v daném místě.
- **Rušivý signál** je elektromagnetický šum, nežádoucí signál nebo změna v samotném prostředí šíření.
- **Elektromagnetické rušení** je jakýkoliv elektromagnetický jev, který může zhoršit provoz přístroje, zařízení nebo systému a nepříznivě ovlivnit živou nebo neživou hmotu.
- **Elektromagnetická interference** je elektromagnetické rušení, které zhoršuje provoz zařízení, přenosového kanálu nebo systému.
- **Elektromagnetická kompatibilita** je schopnost zařízení nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřipustného elektromagnetického rušení pro cokoliv v tomto prostředí.
- **Úroveň vyzařování** je rušení generované samotným konkrétním spotřebičem či zařízením měřené předepsaným způsobem a vyjádřené např. v [dB] v závislosti na kmitočtu.
- **Mez vyzařování** je maximální přípustná (tj. normou povolená) úroveň vyzařování daného zařízení. Rozdíl těchto úrovní vyjadřuje tzv. **rezervu návrhu** daného zařízení z hlediska EMI.
- **Odolnost proti rušení** je schopnost přístroje, zařízení nebo systému být v provozu bez zhoršení charakteristik za přítomnosti elektromagnetického rušení.
- **Úroveň odolnosti** je maximální úroveň rušení působícího na konkrétní zařízení, při němž nedochází ještě ke zhoršení jeho provozu.
- **Mez odolnosti** je nejnižší normou požadovaná úroveň odolnosti daného zařízení.
- **Rezerva návrhu** je rozdíl těchto úrovní zařízení z hlediska jeho odolnosti EMS.
- **Rezerva (rozpětí) EMC** je rozdíl meze (mezi) odolnosti a meze (mezi) vyzařování daného zařízení.

- **Kompatibilní úroveň** jakožto úroveň rušení, při níž je dosaženo ještě "přijatelně vysoké" pravděpodobnosti EMC zařízení. Rozdíly mezi vyzařováním a mezí odolnosti vůči této kompatibilní úrovni (v [dB]) jsou nazývány **rezerva (rozpětí) vyzařování a rezerva (rozpětí) odolnosti**.
- **Citlivost na rušení** je neschopnost přístroje, zařízení nebo systému být v provozu bez zhoršení charakteristik za přítomnosti elektromagnetického rušení.

[B]



Obr. 2) definice úrovní, mezí vyzařování a odolnosti [D]

Předpisy a normy

Po vzniku Evropské unie a zavedením směrnic její Rady bylo nezbytné vytvořit normalizační orgány, které by měly následující úkoly:

- *Vytvářet technické normy platné v rámci Evropské unie.*
- *Harmonizovat tvorbu norem na mezinárodní a národní úrovni.*
- *Koordinovat činnost.*

Z těchto důvodů vznikla komise CENELEC (European Committee for Electrotechnical standardization), která sdružuje 28 národních elektrotechnických výborů evropských států včetně Norska a Švýcarska.

Na celosvětové úrovni toto působení zastává Mezinárodní elektrotechnická komise IEC (International Electrotechnical Committee).

Normy CENELEC jsou převážně založeny na IEC normách a v oblasti povolených mezi vyzařování na normách CISPR (International Special Committee on Radio Interference).

Směrnice č. 89/336/EEC o aproximaci právních předpisů členských států Evropské unie, týkající se elektromagnetické kompatibility, se pro členy EU stala závaznou v roce 1996. Vztahuje se na většinu zařízení se zabudovanými elektrickými a elektronickými součástkami, které jsou určeny na prodej v krajínách EU a též v krajínách EFTA (Evropské sdružení volného obchodu).

Dle zákonů EU, musejí být veškeré výrobky samostatně prodávané a provozované v zemích EU značeny značkou CE a to od 1.1.1996. Toto značení oznamuje, že výrobek vyhovuje všem závazným požadavkům a předpisům ve smyslu požadavků na bezpečnost, ochranu před nebezpečným napětím, EMC, hygienu, ochranu životního prostředí apod. Tímto je zaručena jeho harmonizace s technickými předpisy EU. [E]

V oblasti EMC lze normy rozdělit do tří skupin:

- **Základní normy** – Basic Standards – stanovují základní všeobecné podmínky a pravidla pro testování EMC výrobků. Zaměřeni na prostředí, terminologii, vyzařování a impulsní odolnost.
- **Všeobecné normy** – Generic Standards – jsou vztaženy na jednotlivá prostředí a stanovují minimální požadavky a testovací metody na výrobky. Zaměřeni na vyzařování (harmonické, kolísání napětí, vf rušení po vedení a plem), odolnost, prostory a průmyslové prostředí.
- **Normy výrobků** – Produkt Standards – předepisují požadavky pro příslušný typ zařízení za všech hledisek. Zaměřeni na domácí spotřebiče a podobná zařízení, průmyslová, vědecká a lékařská vf zařízení, motorová vozidla, televizní a rozhlasová zařízení, elektrické pohony a jejich regulace, informační technika.

[C]

EMC a autorizované osoby v ČR

V České republice se řeší problematika EMC pomocí zákona č. 22/1997 Sb. Tento zákon byl novelizován a doplněn zákonem č. 71/2000 Sb. Na tyto zákony navázala řada vládních nařízení. Poslední vládní nařízení je NV č. 616/2006.

Vládní nařízení NV č. 616/2006 Sb. zavádí důležitý pojem tzv. **shoda výrobku**, jakožto výrobku, o němž výrobce či dovozce musí vydat ES prohlášení o jeho shodě s technickými předpisy

a normami a o dodržení stanoveného postupu posouzení této shody. Stanovený výrobek je tedy přístroj či zařízení, které potenciálně může způsobovat elektromagnetické rušení nebo jehož funkce může být takovým rušením ovlivněna. Po úspěšné certifikaci musí být stanovený výrobek před svým uvedením na trh označen značkou shody, pokud to vyplývá z mezinárodní smlouvy, jíž je Česká republika vázána. Značku shodu podle nařízení vlády NV č. 616/2006 Sb. tvoří také písmena **CE** (jeho grafická podoba je stanovena zvláštním právním předpisem).

Posouzení konformity výrobku je prováděno autorizovanou osobou (tedy určeným kompetentním orgánem), tj. subjekty autorizované k činnostem při posuzování shody výrobku z hlediska jejich elektromagnetické kompatibility. [C]

2.2. Typy vzájemných vazeb elektrických obvodů

Elektromagnetické ovlivňování jednotlivých zařízení může být uskutečňováno různými přenosovými cestami. Z hlediska teorie analýzy problematiky lze říci, že se jedná o tyto čtyři možné způsoby:

- *Induktivní vazba*
- *Kapacitní vazba*
- *Galvanická vazba*
- *Elektromagnetická vazba*

Induktivní vazba

Je typická pro dvě galvanicky oddělené smyčky elektrického obvodu, v němž alespoň v jedné z nich protéká proud. Tento proud vytváří magnetické pole. Vzájemný vliv obvodů je dán velikostí proudu, nárůstem či poklesem a magnetickými vlastnostmi prostředí včetně uspořádání obou obvodů. [C]

Při výpočtech induktivní vazby vycházíme z Maxwellovy rovnice pro kvazistacionární pole, která vyjadřuje zákon elektromagnetické indukce v diferenciálním tvaru:

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$$

Kapacitní vazba

Je typická pro uzly galvanicky oddělených elektrických obvodů, při vzájemném působení jednotlivých vektorů \vec{E}_i intenzit elektrostatického pole. Vzájemný vliv obvodů je dán nárůstem nebo poklesem potenciálu příslušného uzlu, plochou elektrod, dielektrickými vlastnostmi prostředí a uspořádáním vodičů v uzlech. [C]

Při výpočtech induktivní vazby vycházíme z Maxwellových rovnic pro elektrostatické pole:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0 \quad \operatorname{div} \vec{D} = \sigma$$

Pro vektor elektrické indukce \vec{D} platí:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}$$

Galvanická vazba

Při této vazbě se jedná o propojení zařízení nebo části zařízení jedním či více vodiči, prostřednictvím kterých dochází k vzájemnému ovlivňování. V případech této vazby se jedná o skutečnost, že elektrotechnické komponenty nejsou ideální. Vždy obsahují jisté parazitní indukčnosti, kapacity a odpory. Pro vyšší kmitočty je tedy potřeba tyto obvody řešit jako obvody s rozloženými parametry a pro nižší kmitočty lze řešit jako obvody se soustředěnými parametry. [C]

Elektromagnetická vazba

Je typická pro galvanicky oddělené obvody, u kterých dochází k výměně elektromagnetické energie formou vyzařování a absorpce výkonu.

Při výpočtech elektromagnetické vazby vycházíme z prvních dvou Maxwellových rovnic. Rovnice platí pro přenos energie prostřednictvím vzduchu:

$$\vec{E} = -\nabla \cdot \varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad \vec{B} = \nabla \times \vec{A}$$

φ – potenciál

\vec{A} – magnetický vektorový potenciál

[C]

2.3. EMC elektrotechnických obvodů

V praxi dnes využívané výkonové elektrotechnické systémy se skládají převážně ze zdrojů nebo generátorů, řídicích a budících obvodů, snímačů, polovodičových obvodů, přepojovacích obvodů a zátěží. Veškeré tyto prvky vytváří při zapojení do společných struktur různé druhy vazeb, které mohou ovlivňovat vlastní zařízení, či ovlivňovat nepříznivými vlivy ostatní zařízení. Obor EMC se především zabývá zlepšením, či zcela odstraněním, nežádoucích vazeb jak ve vlastním zařízení, tak mezi systémy pracujícími ve stejném prostředí.

Zlepšení EMC – zmenšení induktivní vazby

- ***Snížení strmosti nárůstu či poklesu proudu zdroje*** – řeší se prostřednictvím programovatelných vysílacích obvodů, které upravují proud dle požadavků.
- ***Zmenšení délek vyzařujícího a ovlivňovaného obvodu*** – řeší se formou zvyšování hustoty integrace komponentů zařízení (miniaturizace).
- ***Zvětšení délek vyzařujícího a ovlivňovaného obvodu*** – řeší se běžným oddalováním ovlivňovaných obvodů a vhodným konstruktérským návrhem.
- ***Snížení permeability prostředí mezi obvody*** – řeší se pomocí stínících obalů magnetického pole. Magnetické pole po aplikaci zůstává uzavřeno uvnitř obalu a ven se dostává již pouze rozptylové magnetické pole.

Zlepšení EMC – zmenšení kapacitní vazby

Kapacitní vazba je v elektrických obvodech vyjádřena prostřednictvím velikosti jejich vzájemné impedance kapacitního charakteru $Z=1/\omega C$. Je tedy zřejmé, že zvýšení impedance vede ke snížení kapacitní vazby.

- ***Snížení pracovního kmitočtu*** – řešíme již při návrhu obvodu. Nutno zohlednit umístění zařízení pouze pracujících na blízkých pracovních kmitočtech
- ***Snížení elektrické permitivity*** – řeší se pomocí stínících obalů s uzemněním.
- ***Snížení ploch elektrod*** – řeší se integrací a miniaturizací obvodů. Tímto dochází ke snižování parazitních kapacit, avšak nepříznivě narůstají vzájemné kapacitní vazby. Tento problém je řešitelný vhodným návrhem struktury obvodu.

- **Zvýšení vzdálenosti elektrod** – realizuje se u obvodů s velkým rozdílem potenciálů elektrod a velkým rozdílem pracovních kmitočtů. Řeší se lokalizací do samostatných skupin s velkou vzdáleností od sebe a vzájemným oddělením obvodů.

Zlepšení EMC – zmenšení galvanické vazby

Při této vazbě je třeba rozlišovat, zda se jedná o přenos nízkých nebo vysokých kmitočtů. Pro nízké kmitočty je hlavní parametr ovlivňující výslednou vazbu indukčnost a rychlost změny proudu. Pro vyšší kmitočty jsou to charakteristické parametry vedení a přízpusobení zátěže.

Speciální případ představují napájecí obvody síťového harmonického napětí, kde je hlavní snaha o co největší snížení obsahu harmonických.

- **Zmenšení vlastní indukčnosti vodičů obvodu** – řeší se zmenšením délek, zvětšením průřezů a zmenšením vzdáleností od sebe.
- **Snížení rychlosti změny proudu** – lze řešit jen v omezené míře. Realizaci lze provést použitím kapacitních filtrů zapojených paralelně k zátěži. Tyto filtry dodávají nebo absorbují energii při skokových změnách proudů a tím omezují rychlé změny proudu.
- **Parametry vedení a impedanční přízpusobení zátěže** – toto jsou rozhodující faktory při eliminaci účinků galvanické vazby pro obvody s rozloženými parametry (vyšší kmitočty). Důležitým parametrem je zde koeficient odrazu r_u . Jestliže je zátěž přízpusobená je $r_u=0$, impedance zátěže Z_Z je rovna impedanci vedení Z_V . V ostatních případech, tedy pokud se $r_u \neq 0$, dochází ke vzniku odražené vlny. Tato vlna se přičítá k přímé vlně a dochází ke zvyšování účinků galvanické vazby.
- **Snížení obsahu harmonických v napájecí síti** – řeší se vhodným konstrukčním návrhem a zapojením síťových filtračních obvodů. Základními prvky filtračních obvodů jsou odpory, kondenzátory a cívky. Další informace k návrhům filtračních obvodů (odrušovacích filtrů) jsou popsány v kapitole 2.4.5

Zlepšení EMC – zmenšení elektromagnetické vazby

Vliv elektromagnetické vazby se projevuje formou parazitního indukovaného napětí, které se skládá ze dvou složek – elektrické a magnetické.

- **Snížení velikosti a časové změny proudu v obvodu vyzařující elektromagnetickou energii** – silnopróudé zařízení se nacházejí ve větších elektromagnetických polích nežli zařízení slabopróudá. K odrušení těchto polí se využívá elektromagnetické stínění. Platí,

že nízkofrekvenční zařízení vyžaduje složitější a náročnější stínění. Proto výkonové obvody navrhujeme na vyšší spínací kmitočet účinným stínícím obalem.

- **Zkrácení délky obvodu vyzařování** – řeší se miniaturizací obvodů (pouze ve stádiu vývoje).
- **Zmenšení velikosti rušeného obvodu** – řeší se zvyšováním hustoty integrace zařízení
- **Zvětšení vzdálenosti rušeného obvodu od zdroje rušení** – tato metoda se většinou kombinuje s dalšími metodami.
- **Zvětšení koeficientu odrazu vlny, měrného útlumu, velikosti permeability a permitivity** – řeší se prostřednictvím stínících krytů. K eliminaci možných technologických otvorů se využívají kovové samolepící pásy, vodivé tmely atd.

[C]

2.3.1. EMC výkonových polovodičových obvodů

Tuto skupinu reprezentují polovodičové měniče, ve kterých dochází spínáním polovodičových součástek ke změně parametrů elektrické energie ve frekvenčním pásmu od 50 Hz po stovky kHz s výkonovým rozsahem po stovky kilowattů. Je zřejmé, že parametry zhoršující EMC jsou v první řadě vazby induktivní a elektromagnetické. Mohou se vyskytnout i rušivé vazby galvanické a výjimečně kapacitní.

Vazby induktivní mají původ v rychle se měnící velikosti proudy obvodem měniče. Tyto proudy vyvolávají vznik proměnlivých magnetických polí způsobující nárůst velkých indukovaných napětí. Tyto napětí mohou nepříznivě ovlivňovat např. použité číslicové obvody s nízkými úrovněmi napěťových signálů s dopadem na jejich správnou činnost. Způsob řešení tohoto problému byl již uveden v kapitole 2.3. Zlepšení EMC – zmenšení induktivní vazby.

Elektromagnetická vazba je způsobena existencí vyšších spínacích kmitočetů a výkonů. V případě vodičů výkonových obvodů se jedná o antény, které vyzařují neharmonický výkon díky obdélníkovému tvaru proudu a napětí s obsahem širokého spektra harmonických. Tyto harmonické jsou výraznější při násobcích pracovních kmitočetů obvodů. Využitím rezonančních měničů lze redukovat tyto složky pouze na úroveň rezonančního kmitočtu. Zlepšení EMC dosáhneme i zmenšováním výkonových obvodů s vhodně navrženými a realizovanými stínícími kryty.

Vznik galvanické vazby je možno směřovat na dvě místa. První místo kde tato vazba vzniká, je na vodiči, který je spojeným s emitorem výkonového tranzistoru a budícího obvodu, jelikož vždy existuje určitý úsek vodiče společný pro výkonový i nevýkonový obvod. Druhým místem je vodič

záporného pólu napájecího zdroje a záporného pólu pomocného nevýkonového napájecího zdroje. Zde se úbytky napětí vzniklé na společném vodiči přenášejí do všech obvodů napájených pomocným zdrojem.

Kapacitní vazba se vyskytuje mezi výkonovým obvodem a blízkým elektrickým obvodem s velkou vnitřní impedancí. Zde je nutné řešit vhodné impedanční přizpůsobení.

[C] [E]

2.3.2. EMC napájecích zdrojů malého výkonu

Tyto zdroje jsou využívány jako pomocné vícehladinové zdroje stejnosměrného napětí. Skládají se ze síťových transformátorů s hodnotami do stovek wattů, několika sekundárními vynutími a výstupními usměrňovači se stabilizací napětí. Lze je realizovat i jako spínané zdroje, což přináší především úspory v provedení transformátoru a výsledném zmenšení celého napájecího zdroje. Tyto zdroje jsou na druhou stranu osazeny značným počtem polovodičových a pasivních elektrosoučástek, které mohou být zdrojem rušení a poruch.

Z pohledu EMC se jedná o zdroje, které v magnetickém obvodu částečně akumulují elektromagnetickou energii, a proto je zde důležité eliminovat vazby galvanické, elektromagnetické, přepětové a induktivní.

Vznik galvanické vazby je způsoben připojením napájecího zdroje k napájecí síti, v důsledku odběru neharmonického proudu způsobeného zpětným vlivem usměrňovače a nelineárním magnetickým obvodem. Tyto vlivy vznikají i rychlé změny odběru proudu na výstupní straně zdroje. Pro zlepšení EMC je vhodné použít vstupní napájecí filtry, výstupní kapacitní filtry a eliminovat společné vodiče napájení obvodů. Vzájemné propojení obvodů, součástek obvodu a propojení s referenčním potenciálem, by mělo být vždy pomocí jediného bodu, aby nedocházelo k vytváření proudových smyček.

U spínaných zdrojů je možný výskyt elektromagnetické vazby, jelikož jejich pracovní kmitočty se pohybuje v řádech stovek kilohertzů. Zlepšení EMC se provádí stíněním transformátoru nebo celého zdroje.

Přepětové ochrany se využívají z důvodu ochrany před akumulací energie magnetického obvodu transformátoru v okamžiku vrcholu amplitudy napájecího proudu. Tato energie se v případě vypnutí transformátoru mění v přepětí. Toto přepětí je přičítáno k okamžité hodnotě pracovního napětí vstupu i výstupu a bez použití přepětových ochran by docházelo k ohrožení ostatních připojených zařízení.

Induktivní vazba vzniká v blízkosti nestíněného síťového či impulsního transformátoru. Rozptylové magnetické pole vytvoří nežádoucí indukované napětí a tím ovlivní okolní obvody prostřednictvím vodičů jdoucích kolem těchto transformátorů. Z těchto důvodů je zde potřeba dodržování zásad pro redukci elektromagnetické vazby.

[C] [E]

2.3.3. EMC nevýkonných elektrických obvodů

Z velké části se jedná o obvody regulační, řídicí, budící, ochranné a snímací. Tyto obvody zpracovávají slaboproudé signály, dnes již i vysokých kmitočtů se strmými hranami a malém napětí. Jsou realizovány prostřednictvím integrovaných obvodů a procesorů s velkou hustotou integrace. Z důvodu vysoké integrace je pro ně typická vazba kapacitní, galvanická a elektromagnetická.

Kapacitní vazba se projevuje z důvodu dnes již běžně vyráběných vícevrstvých plošných spojů, u kterých jsou blízko sebe velké vodivé plochy o různém potenciálu. Tato vazba se může projevit i u výkonových obvodů s budícími a řídicími obvody, pokud na straně nevýkonové jsou použity součástky s velkou vstupní impedancí. Vysoká vstupní impedance může vytvářet napěťový dělič, který může ovlivňovat zpracovávání signálů např. operačních zesilovačů řízených polem a MOSFET tranzistorů.

Společné vodiče u nevýkonných elektrických obvodů způsobují galvanickou vazbu, kterou je třeba eliminovat využitím filtrů.

Pro vysoké kmitočty je typická elektromagnetická vazba. Projevuje se především u číslicových obvodů s vysokým pracovním kmitočtem. Propojení takových obvodů je nutno řešit jako vedení s rozloženými parametry i přes jejich malý rozměr. Z důvodu zlepšení EMC se proto snažíme o správné impedanční přizpůsobení propojovacích vedení, náhradu klasických propojení za koaxiální nebo stíněné a snižování rozměrů. Důraz musí být kladen i na konstrukci plošného spoje s řešením vř částí obvodů.

[C] [E]

2.3.4 EMC vedení s rozloženými parametry

S rozloženými parametry vedení se setkáváme jak u nevýkonových elektronických obvodů, tak u propojování výkonových polovodičových obvodů se zátěží. Jedná se o přenos formou neharmonických signálů s vyšším kmitočtem s následkem vzniku elektromagnetické a galvanické vazby.

Vazba elektromagnetická vzniká tak, že propojovací vedení tvoří jakousi vyzařovací anténu ve tvaru smyčky. Pro snížení vlivu této vazby je zapotřebí umisťovat vodiče co nejbližší k sobě a provést jejich překroucení v celé délce. Pro přenos malých výkonů je vhodné využít koaxiální kabely.

Galvanická vazba se projevuje na propojovacích vedeních napětím, které je vyvolané od zátěže odraženou zpětnou vlnou, tzv. superponované napětí. Eliminace se provádí impedančním přizpůsobením vedení a zátěže.

[C] [E]

2.4. Harmonické v elektrických sítích

2.4.1. Charakteristika harmonických frekvencí

Aby bylo možné určit vliv spotřebičů na napájecí soustavu, je nutné definovat pojem harmonická. Podle normy ČSN IEC 50 je definována harmonická jako složka většího než 1. řádu Fourierovy řady periodické veličiny. Dále je v této normě definována základní harmonická jako složka 1. řádu Fourierovy řady periodické veličiny. Řád harmonické je celé číslo, které je poměrem kmitočtu harmonické a základní harmonické. Dle norem jsou harmonické označovány písmenem h . Harmonické frekvence lze tedy charakterizovat jako celé násobky základní harmonické napájecího napětí. Při frekvenci 50 Hz je tedy druhá harmonická 100 Hz, třetí 150 Hz, čtvrtá 200 Hz, atd.

V proudech odebíraných polovodičovými měniči se mohou objevovat též frekvence, jejichž hodnota není celočíselným násobkem základní harmonické. Jedná se o tzv. meziharmonické. [M]

U obvodů s výskytem neharmonických průběhů jsou definovány veličiny napětí, proud a výkon takto:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_h^2} = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} U_h^2}$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_h^2} = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2}$$

zdánlivý výkon:

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} U_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2}$$

činný výkon:

$$P = \sum_{h=0}^{\infty} P_h = P_0 + \sum_{h=1}^{\infty} P_h = \sum_{h=0}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h$$

jalový výkon:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h$$

deformační výkon:

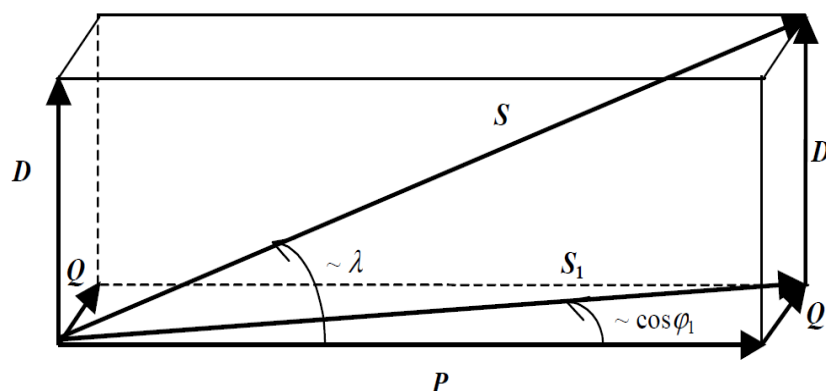
$$D = \sqrt{S^2 - P^2 + Q^2}$$

Deformační výkon a jalový výkon představuje neúčinnou složku zdánlivého výkonu, který vyvolává nárůst ztrát v napájecí síti a snižuje využitelnost sítě. Pro neharmonické obvody je zaveden tzv. skutečný účinník λ (power factor PF), jelikož uvádění pouze účinníku $\cos \varphi$ je nedostatečné.

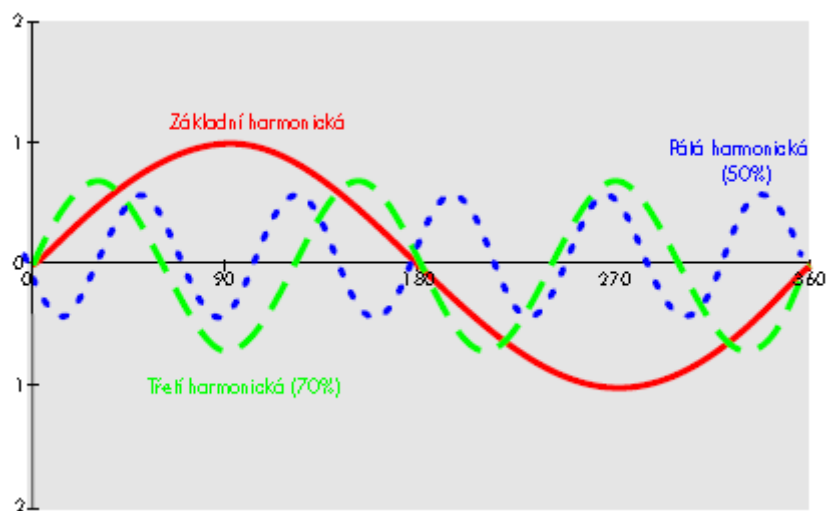
skutečný účinník:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$

[M]

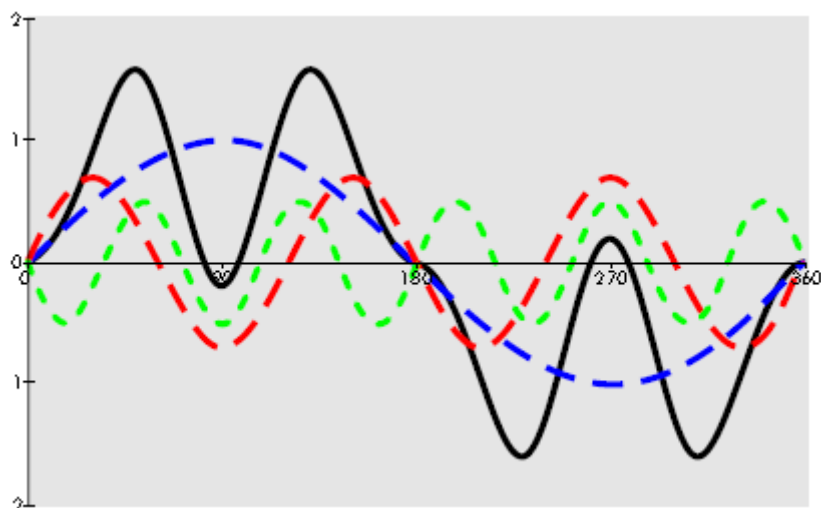


Obr. 3) diagram složek výkonů pro neharmonické průběhy [G]



Obr. 4) sinusový průběh základní, třetí a páté harmonické [F]

V praxi se setkáváme i s průběhy proudu, které nemají sinusový průběh. Tyto nesinusové průběhy mohou mít během periody i více průchodů nulou, což pro zařízení, které využívá průchod nulou jako referenční, bude mít za následek nesprávný chod. Tyto neharmonické průběhy mají negativní vliv i na měřicí přístroje, které měří efektivní hodnoty.



Obr. 5) sinusový průběh základní, třetí a páté harmonické s nesinusovým průběhem [F]

Při řešení harmonických v elektroinstalacích, nás zajímá nejvíce především proud, protože způsobuje vznik dalších harmonických proudů a je zdrojem většiny negativních vlivů na tuto síť. Bez znalosti spektra harmonických proudů nelze provádět žádné závěry a hodnocení. Velmi často se pro charakterizování obsahu harmonických používá činitel harmonického zkreslení (THD). Pokud

se harmonické šíří systémem bez ohledu na výskyt harmonických proudů, šíří se jako harmonická napětí. Hodnoty napětí i proudů jsou měřitelné a lze tyto zmíněné hodnoty definovat jako napětí a proud. Obecně je činitel harmonického zkreslení proudů označován písmenem I, např. 35 % THDI, a činitel harmonického zkreslení napětí je označován písmenem U, např. 4 % THDU. [F]

Symetrická a nesymetrická složka rušení

Jedná se o vf rušivé proudy tekoucí obvodem a rušivá napětí na náhradních impedancích obvodu, vzniklá v důsledku těchto proudů, nebo přenesená z okolí do obvodu parazitními vazbami.

Rušivý symetrický proud je superponován na pracovní proud obvodu, je s ním ve fázi a teče stejnými vodiči – fázovým a středním (nulovým) ve střídavých obvodech nebo kladným a záporným ve stejnosměrných obvodech. Jako i pracovní proud mají symetrické proudy v živém a zpětném vodiči stejnou hodnotu, ale opačnou fázi, tj. jsou navzájem posunuty o 180° elektricky.

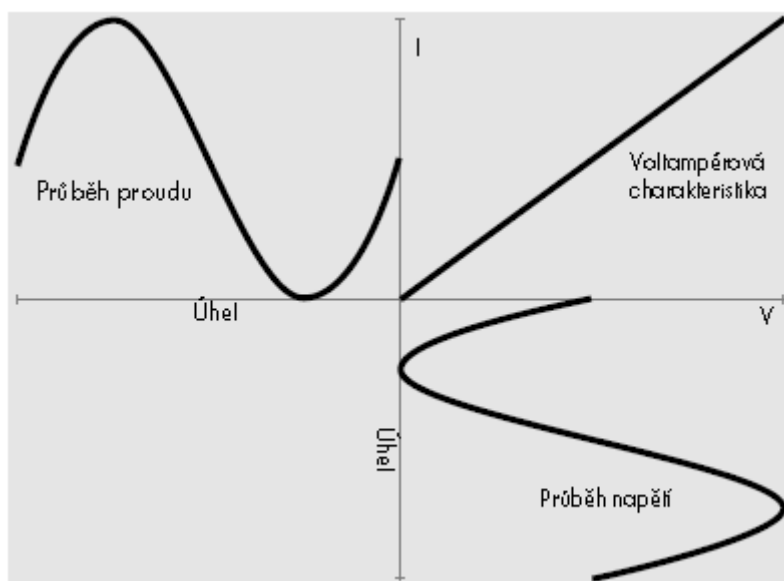
Nesymetrické proudy tečou každým vodičem obvodu (fázovými) a středním (zpětným) a mají vůči společné zemi stejný potenciál a fázi. Obvod se chová tak, jako kdyby fázové a střední vodiče byly spojeny paralelně a proudy tekly mezi touto paralelní kombinací a zemním vodičem. Pracovní proud je vektorovým součtem proudů symetrické a nesymetrické složky. [F]

2.4.2. Základy generování harmonických

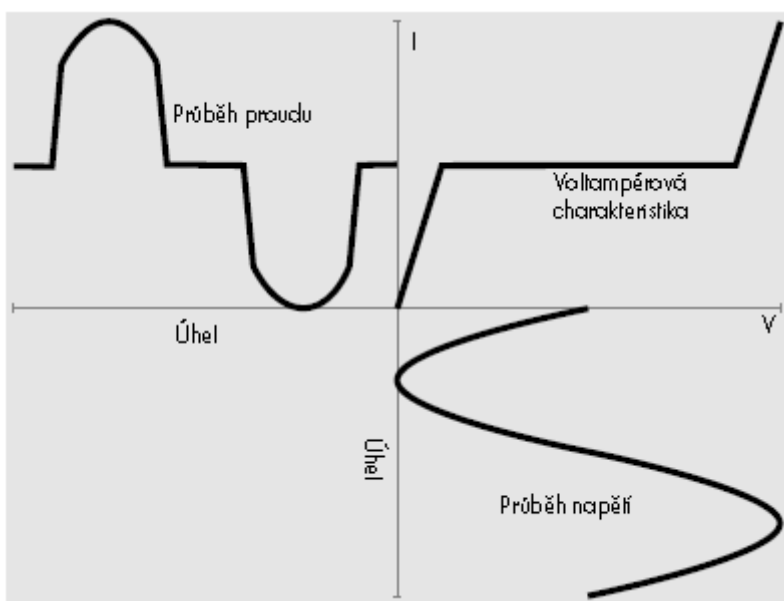
V ideálním elektrickém systému je tvar napětí a proudů sinusový. Ve skutečnosti je vlivem nelineárních zátěží napájených sinusovým napětím proud nesinusový. V obvodě s lineárními prvky RLC je proud úměrný napájecímu napětí. Pokud se v obvodu vyskytne reaktanční prvek, vznikne mezi proudem a napětím fázový posuv, který je buď kapacitního, nebo induktivního charakteru. Tímto se sníží účinnost, ale obvod je stále lineární.

Skutečné voltampérové charakteristiky zátěží jsou mnohem složitější. Vyskytují se u nich asymetrie, hystereze, body zlomů a sklony se mění dle parametrů zátěže.

Jako příklad bude uveden průběh, kde jako nelineární zátěž zvolíme dvoucestný usměrňovač s filtračním kondenzátorem. V takovémto případě protéká proud pouze tehdy, pokud napájecí napětí překročí napětí na kondenzátoru, tzn. hodnota sinusového napětí se blíží špičkové.



Obr. 6) časový průběh napětí a proudu lineární zátěží [F]



Obr. 7) časový průběh napětí a proudu nelineární zátěží [F]

Při rozboru průběhů můžeme tyto rozdělit na sinusové průběhy o základní frekvenci a sinusové průběhy harmonických frekvencí. Pro symetrické křivky, tzn. kladná a záporná půlperioada má stejnou velikost a tvar, jsou veškeré sudé harmonické nulové. Dnes se již výskyt sudých harmonických projevuje velice zřídka, z důvodu nevyužívání jednocestných usměrňovačů.

Pokud ověřujeme výskyt či absenci harmonických, je nutné vždy měřit proud, jak již bylo uvedeno dříve.

2.4.3. Elektrická zařízení generující harmonické

Veškeré nelineární spotřebiče jsou zdrojem harmonických proudů. Tyto spotřebiče mohou být jak jednofázové tak třífázové. Jako nelineární zátěž si lze představit každou zátěž, která má jiné parametry nežli odporovou. Mezi běžné odporové zátěže patří např. žárovky a odporové ohřívače.

Jednofázové nelineární zátěže

- *Spínané zdroje*
- *Malé UPS zdroje*
- *Elektronické předřadníky kompaktních svítidel*

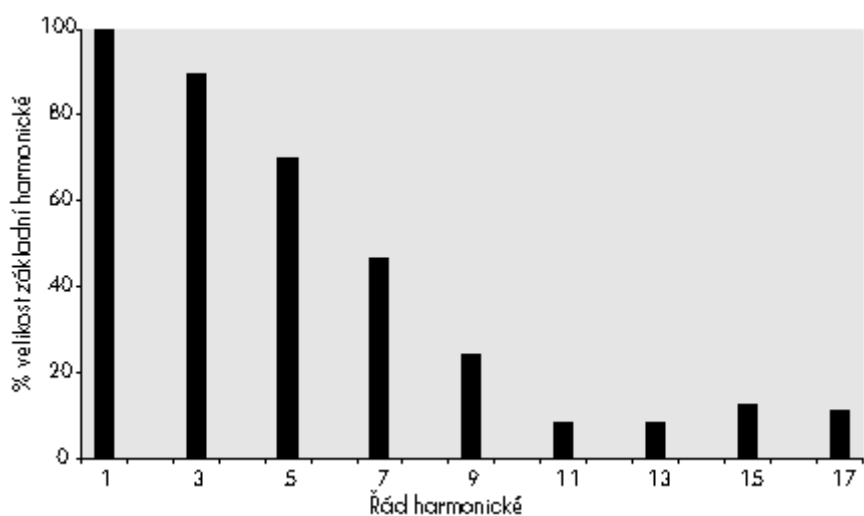
Třífázové nelineární zátěže

- *Velké UPS zdroje*
- *Elektronické regulace pohonů*

Jednofázové spínané zdroje a malé UPS zdroje

Převážná část moderních elektronických zařízení využívá pro napájení spínaný zdroj. Jedná se o náhradu klasických transformátorů a usměrňovačů přímo řízeným usměrňovačem, který nabíjí kondenzátor a ten napájí stejnosměrným proudem zátěž. Výhodou těchto zdrojů je nízká cena a váha. Napájecí zdroj může být vyroben dle požadovaného činitele tvaru. Nevýhodou je odebírání nelineárního pulsujícího proudu z napájecí sítě, který obsahuje velké množství harmonických vyšších řádů s obsahem vysokofrekvenčních složek.

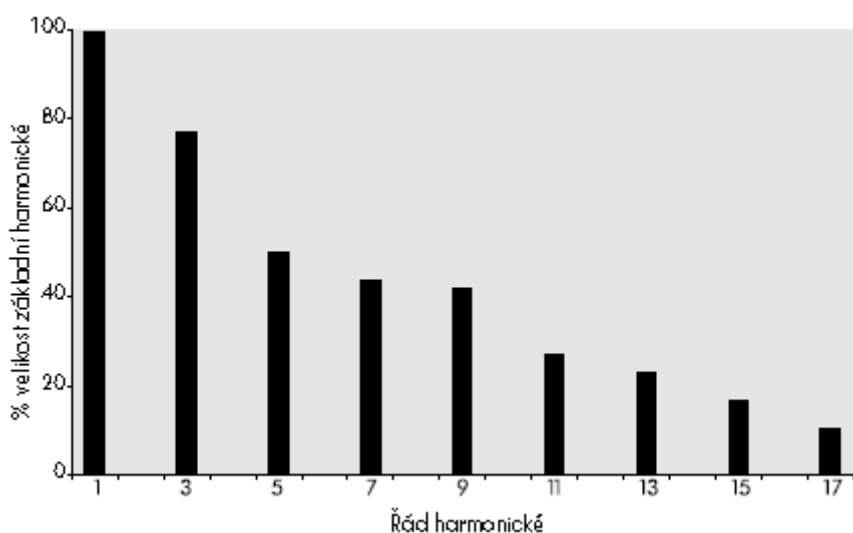
Na stejném elektronickém základě pracují i veškeré malé jednofázové záložní UPS systémy. Samozřejmě, že i zde se projevují negativní vlivy harmonických, které ovlivňují napájecí síť.



Obr. 8) spektrum harmonických běžného spínaného zdroje (PC zdroj) [F]

Elektronické předřadníky kompaktních svítidel

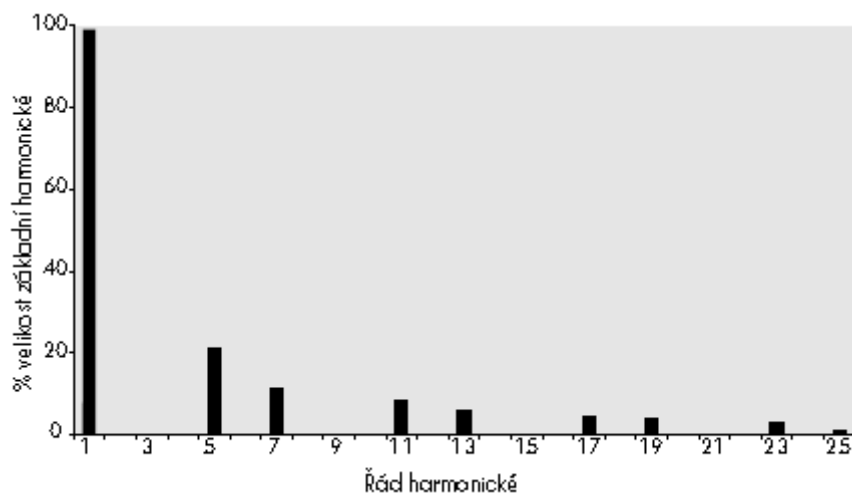
Tyto předřadníky slouží k vylepšení účinnosti svítidel. Účinnost elektronických předřadníků je však jen o něco málo vyšší, nežli u elektromagnetických předřadníků. Vyšší účinnost svítidel je dána především napájením o vyšší frekvenci. Výhodou elektronických předřadníků je, že úroveň osvětlení je zachována s prodlouženou životností díky proudové zpětné vazbě. Nevýhodou je generování harmonických v odebíraném proudu. [F]



Obr. 9) spektrum harmonických běžného kompaktního svítidla (zářivkové svítidlo) [F]

Třífázové UPS zdroje a elektronické regulace pohonů

Princip těchto zdrojů a regulátorů je založen na principu třífázového můstku, neboli šestipulzním usměrňovači. V těchto obvodech se vyskytuje šest pulzů za jednu periodu na stejnosměrném výstupu. Šestipulzní můstky generují harmonické v řádu o jeden nižší a o jeden vyšší než je šestinásobek základní harmonické ($6n \pm 1$).



Obr. 10) spektrum harmonických šestipulzního můstku [F]

Pokud použijeme 12-ti pulzní můstek, lze významně redukovat velikost harmonických. Jedná se o dva 6-ti pulzní můstky napájené z vinutí transformátoru napojeného jako hvězda/trojúhelník s fázovým posunem 30° mezi těmito vinutími. Teoreticky je možné docílit omezení harmonických řádů $6n$, ale v praxi omezení závisí na přizpůsobení použitého střídače. Harmonické řádu $12n$ jsou stále nezměněny, ale protože se jedná o harmonické vyšších řádů, je jejich odstranění pomocí filtrů mnohem snadnější.

Dále je možné realizovat zvýšení pulzů na 24, pomocí dvou 12-ti pulzních můstků s fázovým posunem 15° na transformátoru. Výhodou tohoto zapojení je redukce harmonických proudů o cca 4,5 %, avšak značně narůstá cena těchto zařízení. [F]

2.4.4. Vliv harmonických na napájecí síť a elektroinstalace

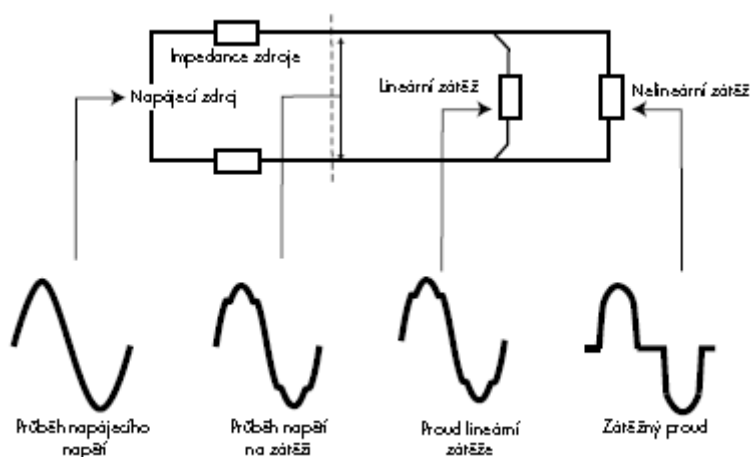
Negativní vliv harmonických se projevuje jak v napájecích sítích, tak v elektroinstalacích. Omezování těchto vlivů je velice individuální a rozdílné a nelze vždy jednoznačně určit způsob odstranění nebo snížení tohoto vlivu.

Problémy způsobené harmonickými napětími v elektroinstalacích

- *Zkreslení napětí*
- *Indukční motory*
- *Poruchy při průchodu nulou*

Zkreslení napětí

Harmonický proud protékající zátěží způsobuje napět'ové zkreslení na impedanci napájecí sítě. Tuto impedanci dělíme na dvě části. Impedance kabelů od napájecího bodu a impedance napájecí sítě. Deformovaný proud nelineární zátěže má za následek vznik deformovaných úbytků napětí na impedanci zátěže. Tato deformace je promítnuta do všech připojených zátěží včetně lineárních. Odstranění tohoto vlivu se provádí oddělením obvodů generující harmonické od obvodů citlivých na harmonické.



Obr. 11) zkreslení vlivem nelineární zátěže [F]

Indukční motory

U indukčních motorů má vliv napětového zkreslení na nárůst ztrát vířivými proudy obdobně jako u transformátorů. Tyto ztráty vznikají vlivem generování harmonických polí ve statoru. Vzniklé harmonické pole se pokouší o otáčení motorů různou rychlostí směrem vpřed či vzad. Čím jsou harmonické proudy o vyšších frekvencích, tím dochází k většímu nárůstu ztrát.

Poruchy při průchodu nulou

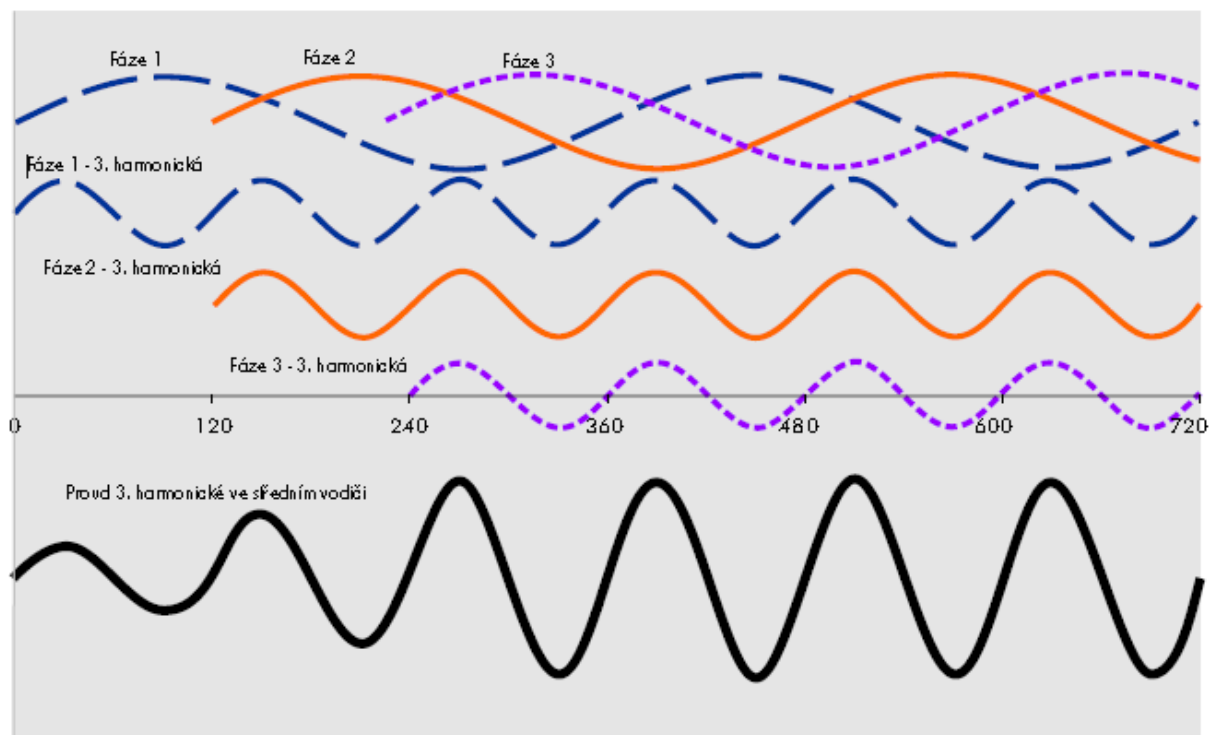
Mnohé zařízení jsou pomocí elektronických regulátorů navrženy tak, aby vypnutí zátěže probíhalo při průchodu napájecího napětí nulou. Tohoto stavu se využívá především u induktivních zátěží, jelikož vypínání v tomto bodě nezpůsobuje přechodové jevy a tím pádem se snižují elektromagnetické interference. Pokud nedochází k redukci harmonických v napájecím napětí, je problém s identifikací průchodu nulou např. pro řídicí regulátory. V takové napájecí síti může být i několik průchodů nulou během jedné půlperiody. [F]

Problémy způsobené harmonickými proudy v elektroinstalacích

- *Přetížení středního vodiče*
- *Vliv na transformátory*
- *Rušení spínání vypínačů*
- *Přetěžování kondenzátorů*
- *Skinefekt*

Přetížení středního vodiče

Pro třífázovou síť platí, že fázová napětí jsou při shodném zatížení posunuty o 120° . V tomto případě je proud tekoucí středním vodičem roven nule. Při nevyvážení zátěže jednotlivých fází dochází k průchodu proudu středním vodičem, který je výsledkem vektorového součtu fázových proudů s hodnotou nižší nežli proudy fázové. Problém nastává však i při shodném zatížení fází a to u proudů harmonických, respektive třetí harmonické a jejich násobků. Zde dochází ke sčítání těchto proudů ve středním vodiči.



Obr. 12) sčítání třetích harmonických a jejich násobků ve středním vodiči [F]

Na obrázku jsou zakresleny složky třetí harmonické fázových proudů (střední část obrázku), které se při shodné amplitudě a fázovém posunu 120° sčítají ve středním vodiči. V každé fázi je 70 % proudu třetí harmonické využito k výsledné hodnotě fázového proudu středního vodiče. V součtu se jedná o 210 % hodnoty fázového proudu.

Ze studií vyplývá, že v elektroinstalacích je proud tekoucí středním vodičem mezi 150 % až 210 % hodnoty fázového proudu. Při návrhu elektroinstalací je třeba tento problém zohlednit. Řešení spočívá v použití vodičů, kde střední vodič má dvojnásobný průřez, či zdvojením středního vodiče. Je však potřeba brát v úvahu i zatížitelnost vodičů, tedy zahřívání vodičů. Vzhledem k tomu, že se počítá pouze se zatěžováním fázových vodičů a v praxi dochází k zatěžování i středních vodičů, je nutné snížit zatížitelnost vodiče na 60 % jmenovité hodnoty. [F]

Vliv na transformátory

Harmonické proudy ovlivňují transformátory vznikem ztrát vířivými proudy a cirkulací třetích harmonických.

Ztráty vířivými proudy se pohybují běžně kolem 10 % ztrát a rostou s kvadrátem řádu harmonických. Nelineární zátěž se vyznačuje dvojnásobnými hodnotami ztrát proti lineárnímu zatěžení.

Výsledkem tohoto stavu je zvýšení provozní teploty a zkrácení životnosti transformátoru. Je proto nutné řešit vhodné zatížení transformátoru vzhledem k volbě zařízení.

Vliv cirkulací třetích harmonických je způsoben zapojením transformátoru do trojúhelníka. U tohoto zapojení jsou třetí harmonické ve fázi a uzavírají se v tomto vinutí a nešíří se do napájecí sítě. Tyto harmonické proudy musejí být brány v úvahu při stanovení jmenovitého zatížení trojúhelníka. [F]

Rušení spínání vypínačů

Problém při vyhodnocení vypínacích časů jistících a ochranných prvků může být způsoben jak nevhodným sčítáním harmonických proudů v těchto zařízeních, tak i nevhodným filtrováním generovaných spínacích poruch. Řešení spočívá ve využití více obvodů, z nichž každý napájí několik zátěží a využití vhodného měření efektivních hodnot.

Přetěžování kondenzátorů

Tento problém se týká jak kompenzačních kondenzátorů využívaných pro kompenzaci fázového posunu tak i běžných filtračních kondenzátorů veškerých napájecích zdrojů, které jsou napojeny přímo na napájecí síť. Impedance kondenzátorů klesá s nárůstem frekvence proti napájecí síti, kde s nárůstem frekvence impedance stoupá. Při vyšší frekvenci tedy dochází k většímu zatěžování kondenzátorů harmonickými proudy s následkem poškození samotného kondenzátoru. Toto zatěžování se projevuje i nárůstem provozní teploty samotného kondenzátoru, což je další důsledek jeho degradace.

Tomuto problému se lze vyvarovat vložením tlumivky před samotný kondenzátor. Hodnota tlumivky se volí tak, aby celková impedance byla induktivní pro nejmenší výraznou harmonickou.

V praxi se často setkáváme s paralelním zapojením kondenzátorů z důvodu zvýšení kapacity, mezi které je vložena zmíněná tlumivka. Jelikož je však tlumivka vložena v sérii mezi kondenzátory, nechrání první kondenzátor, na kterém je z tohoto důvodu zaznamenána porucha vlivem harmonických frekvencí pocházejících z napájecí sítě. Toto zapojení je dnes zcela běžné u spínaných zdrojů mnohých elektronických zařízení. Z důvodu poruchy na těchto filtračních kondenzátorech dochází ke změně výstupních parametrů zdroje a v některých případech i k poruše následných elektronických obvodů.

Skinefekt

Jedná se o jev, při kterém má proud tendenci protékat okrajovou plochou vodiče. Projevuje se nejčastěji při vyšších frekvencích. Vzhledem k harmonickým proudům je nutné tento efekt brát

v úvahu od sedmé harmonické, tj. nad 350 Hz, jelikož může způsobovat přídavné ztráty a zvyšovat oteplení vedení a přípojníc. Pokud je znám výskyt harmonických těchto řádu, je třeba tento vliv řešit již při projekčním návrhu.

Problémy způsobené harmonickými proudy v napájecích sítích

- *Deformování napětí (zkreslení)*

Deformování napětí

Pokud má harmonický proud původ v napájecí síti, pak roste úměrně i harmonické zkreslení napětí s impedancí napájecí sítě a s harmonickým proudem. Impedance napájecí sítě je převážně induktivního charakter, a proto její amplituda roste se zvyšující se frekvencí. Deformace napětí harmonickými proudy z nelineárních spotřebičů a zkreslení příslušných transformátorů přispívá k dalšímu deformování napájení napájecích sítí. [F]

2.4.5. Způsoby omezování harmonických v elektrických sítích

V předchozích kapitolách byl již zmíněn způsob omezování harmonických v některých případech. Nyní bude proveden rozbor hlubší. Vycházíme li ze základního řetězce, lze omezovat rušení ve třech oblastech.

- *U zdroje rušení (vysílač)*
- *V objektu rušení (přijímač)*
- *Na přenosové trase (vazba)*

Nejvýhodnější je potlačování rušení u zdroje, neboť je zaručeno odrušení i ostatních objektů a nikoliv pouze vyšetřovaný přijímač. Naopak se nedá toto odrušení využít u zařízení, pro které je rušivý signál potřebný.

Technické prostředky, které se využívají k potlačení elektromagnetického rušení, se nazývají *odrušovací prostředky*.

Mezi odrušovací prostředky patří:

- *Odrušovací tlumivky a tlumivkové filtry*
- *Odrušovací kondenzátory a kondenzátorové filtry*

- *Odrušovací filtry LC*
- *Přepětové ochranné prvky (bleskojistky, varistory, omezovací diody)*
- *Elektromagnetické, elektrické a magnetické stínění*

[B]

Volbu příslušného odrušovacího prostředku provádíme podle toho, zda chceme odstranit rušení šířící se po vedení, nebo šířící se vyzařováním. V některých případech je třeba přistoupit k volbě odrušovacích prostředků oběma způsoby. Může vzniknout i situace, že zvolený způsob odrušení může být příčinou zhoršení parametrů odrušovaného zařízení.

Odrušovací tlumivky

Jedná se o nejobjemnější a nejnákladnější prvky v odrušovací technice. Jejich velikost je dána zejména velikostí protékajícího proudu. Odrušovací tlumivka se vkládá do série s vnitřní impedancí sítě Z_S a vstupní impedancí chráněného zařízení Z_Z . Analýzou lze určit vložený útlum.

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| 1 + \frac{j\omega L}{Z_S + Z_Z} \right| \quad (\text{dB})$$

U_2 – napětí výstupu filtru

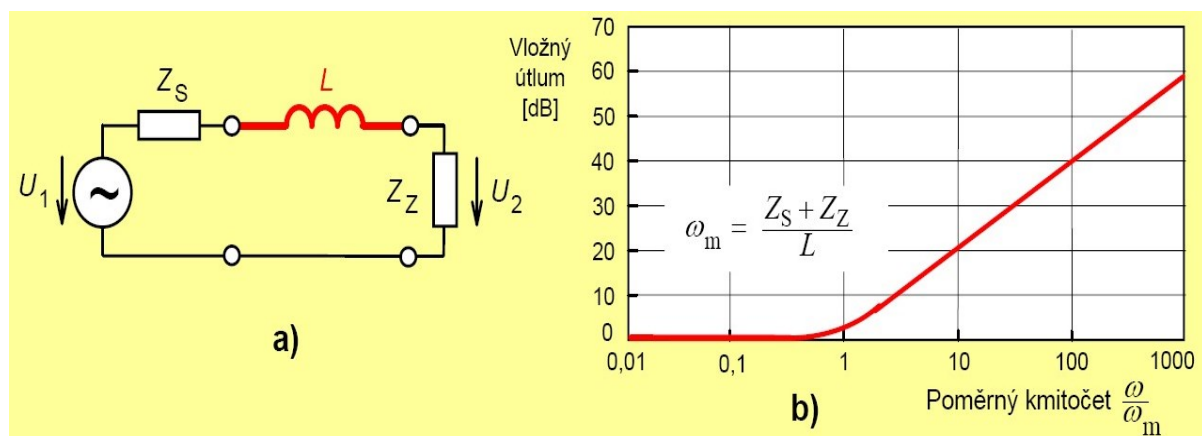
U_{20} – stejné napětí bez filtru

Na dalším obrázku jsou znázorněny dvě možné oblasti vloženého útlumu tlumivky (část b).

$$L \approx 0 \quad (\text{dB}) \quad \text{pro} \quad \omega L \ll Z_S + Z_Z$$

$$L \approx 20 \cdot \log \frac{\omega L}{Z_S + Z_Z} \quad (\text{dB}) \quad \text{pro} \quad \omega L \gg Z_S + Z_Z$$

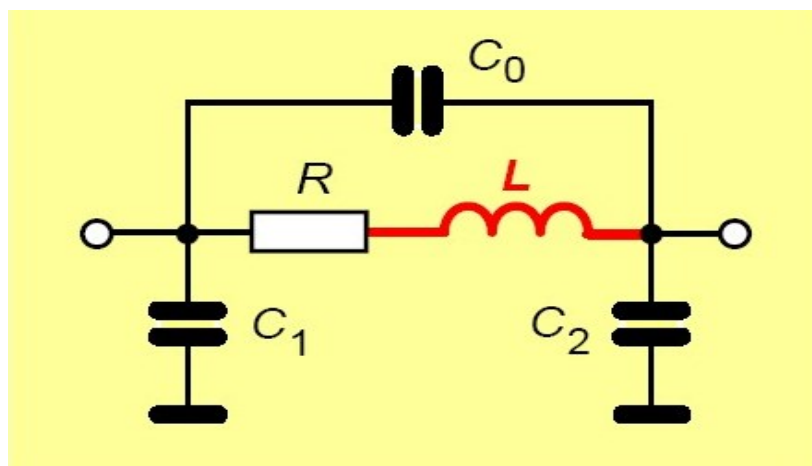
[B]



Obr. 13) zapojení odrušovací tlumivky a průběh vloženého útlumu tlumivky [G]

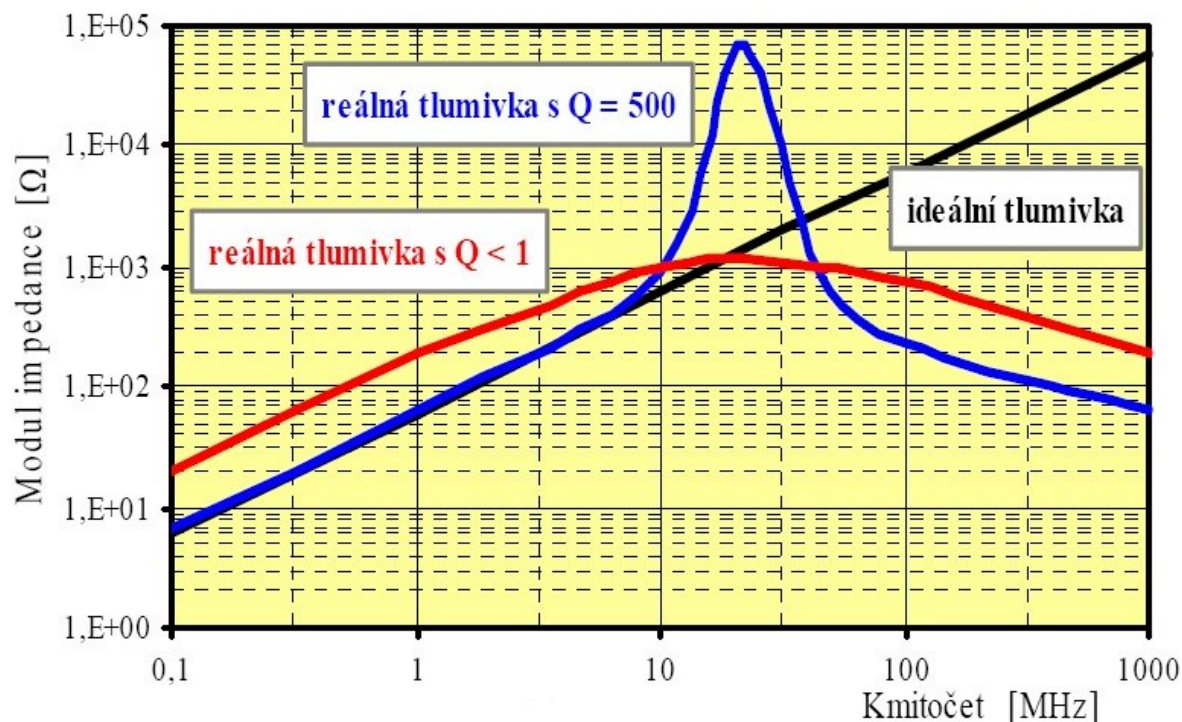
Tlumivku lze pro účelné potlačení rušení na vedení použít pouze v nízkoimpedančních systémech. Znamená to, že impedance zdroje i přijímače rušení jsou mnohem menší, nežli reaktance tlumivky na kmitočtech odrušovaného pásma. Vyhoví-li tlumivka svým vloženým útlumem v určitém impedančním systému ($Z_S \approx Z_Z \approx 50 \Omega$), vyhoví i v systému s nižšími hodnotami impedancí zdroje a přijímače rušení. [B]

Důležitou elektrickou vlastností tlumivek jsou jejich parazitní parametry. Kromě žádoucího parametru indukčnosti L , jejíž hodnota by měla být co největší, vykazuje každá tlumivka ztrátový odpor vinutí R a parazitní kapacity C (mezizávitovou proti jádru, příp. proti zemi). Tyto kapacity způsobují, že tlumivka se chová jako rezonanční obvod, který nad svým rezonančním kmitočtem má kapacitní charakter a s rostoucím kmitočtem zhoršuje odrušovací efekt, tj. snižuje velikost vloženého útlumu. Tato vlastnost je zobrazena na obrázku výše (část b). [G]



Obr. 14) náhradní schéma reálné odrušovací tlumivky [G]

Situace je doložena na obrázku č. 15. Kmitočtovými průběhy velikosti impedance ideální tlumivky, reálné tlumivky s vysokým činitelem jakosti Q a s nízkým činitelem jakosti Q . Právě tento průběh (pro hodnotu $Q < 1$) je vhodný pro odrušovací tlumivky. Pozvolným přechodem tlumivky její vlastní rezonancí se totiž rozšiřuje odrušované pásmo, neboť nad rezonančním kmitočtem se taková tlumivka nechová jako čistá kapacita, ale spíše jako kmitočtově závislý odpor. Pokles vloženého útlumu je tak méně strmý. [G]



Obr. 15) kmitočtová závislost odrušovací tlumivky [G]

Požadavky na odrušovací tlumivky

- Velká indukčnost (mH) při malých rozměrech, malém počtu závitů, nízké hmotnosti a ceně.
- Vysoký vlastní rezonanční kmitočet tlumivky, tj. minimální parazitní kapacity tlumivky.
- Mimo oblast síťových kmitočtů (obvykle 50 ÷ 400 Hz) musí mít tlumivka co největší činné ztráty, tedy co nejmenší činitel jakosti ($Q < 1$). Typická hodnota vloženého útlumu síťové tlumivky činí 15 ÷ 20 dB na kmitočtu řádu 100 kHz.
- Tlumivka s feromagnetickým jádrem se nesmí přesycovat při proudech, pro něž je určena.
- Tvar magnetického obvodu jádra a jeho permeabilita musí být takové, aby umožňovaly dosáhnout maximální indukčnosti při minimálním počtu závitů tlumivky.

[B]

V zásadě dělíme tlumivky do dvou skupin. Tlumivky pro potlačení symetrické složky rušení v napájecích obvodech, pro potlačení parazitních vazeb mezi signálovými a řídicími obvody, vysokofrekvenční blokovací tlumivky. Tyto tlumivky se zapojují běžným způsobem podélně do proudových vodičů a pracovní proud obvodu jimi protéká ve stejném směru jako rušivý proud. Druhou skupinu tvoří tlumivky pro potlačení nesymetrické složky rušení v napájecích obvodech, tzv. tlumivky s proudovou kompenzací. Princip této tlumivky spočívá v tom, že fázový a zpětný vodič

(příp. fázové vodiče a zpětný vodič) jsou navinuty na společném jádru ve stejném smyslu tak, že pro pracovní proud 50 Hz a pro protifázové rušivé proudy mají jejich magnetické toky opačný směr, vzájemně se ruší a výsledná indukčnost pro pracovní proud 50 Hz je téměř nulová. [B][G]

Odrušovací kondenzátory

Používají se jako samostatný prvek, nebo v určitém kombinačním zapojení, případně jako součástí LC či RC článků. Zapojuje se paralelně k vnitřní impedanci sítě Z_S a vstupní impedanci chráněného zařízení Z_Z . Analýzou lze určit vložený útlum.

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| 1 + j\omega C \cdot \frac{Z_S \cdot Z_Z}{Z_S + Z_Z} \right| \quad (\text{dB})$$

U_2 – napětí výstupu filtru

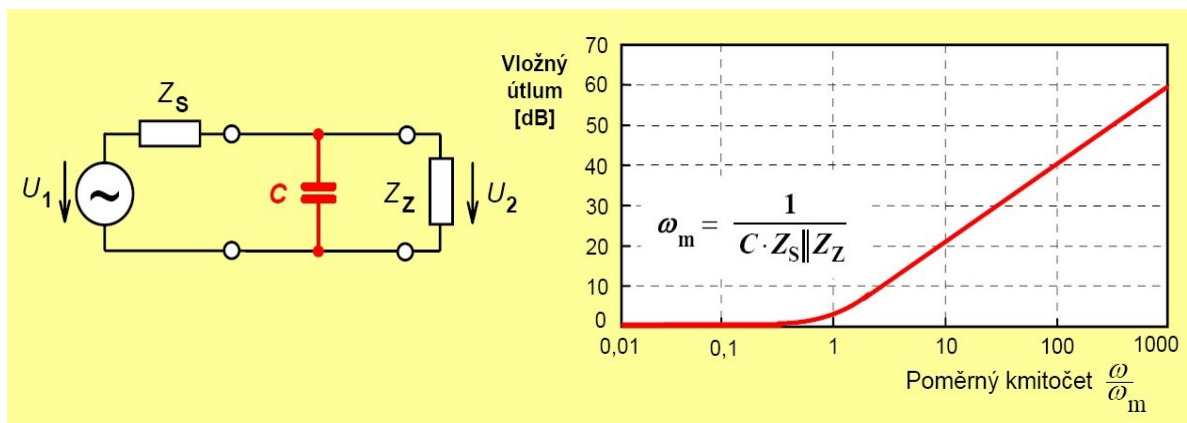
U_{20} – stejné napětí bez filtru

Na dalším obrázku jsou znázorněny dvě možné oblasti vloženého útlumu kondenzátoru.

$$L \approx 0 \quad (\text{dB}) \quad \text{pro} \quad \omega C \ll 1/(Z_S / Z_Z)$$

$$L \approx 20 \cdot \log \left(\omega C \cdot \frac{Z_S \cdot Z_Z}{Z_S + Z_Z} \right) \quad (\text{dB}) \quad \text{pro} \quad \omega C \gg 1/(Z_S / Z_Z)$$

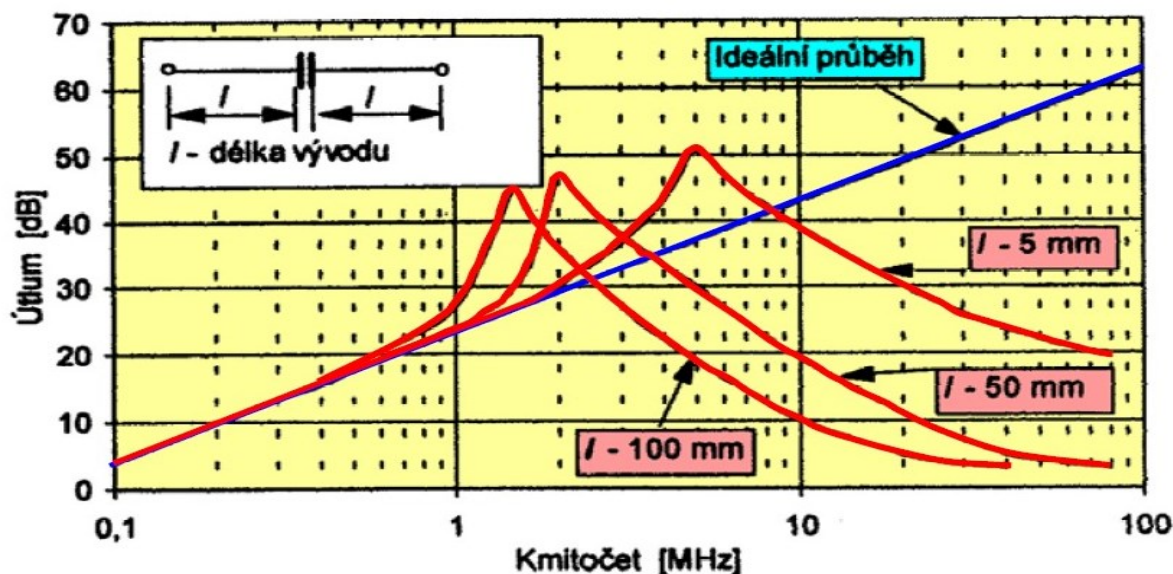
[B]



Obr. 16) zapojení odrušovacího kondenzátoru a průběh vloženého útlumu tlumivky [G]

Použití odrušovacích kondenzátorů nebo kondenzátorových filtrů je tedy účinné tehdy, jeli jejich reaktance mnohem menší, než vnitřní impedance zdroje rušení a impedance napájecí sítě. Odrušovací kondenzátor je tedy nutno užívat ve vysokoimpedančních systémech. Pro nízké hodnoty

impedancí zdroje a přijímače rušení účinnost odrušení kondenzátorem klesá. Podobně jako u tlumivek, mají i pro odrušovací vlastnosti kondenzátorů zásadní význam jejich parazitní parametry, z nichž nejdůležitější jsou parazitní indukčnost přívodů kondenzátoru a jeho svodový odpor. Indukčnost přívodů vytváří s vlastní kapacitou kondenzátoru parazitní rezonanční obvod, nad jehož rezonančním kmitočtem má odrušovací kondenzátor induktivní charakter a jeho vložený útlum s rostoucím kmitočtem klesá. [B]



Obr. 17) vliv délky přívodů dvojpólového kondenzátoru 250 nF na vložený útlum [G]

Velikost kapacity odrušovacího kondenzátoru volíme v závislosti na kmitočtu rušení. Čím nižší je dolní kmitočet potlačovaného pásma, tím větší kapacitu volíme. V nejčastějším případě širokopásmového rušení dosáhneme lepšího výsledku použitím několika kondenzátorů menších hodnot spojených paralelně.

Odrušovací kondenzátory v podstatě zkratují rušivé napětí k zemi či kostře chráněného přístroje. Jejich důležitými vlastnostmi jsou tedy rovněž průrazné parametry z hlediska bezpečnosti proti úrazu elektrickým proudem.

Z tohoto hlediska se odrušovací kondenzátory dělí na dvě třídy:

- Kondenzátory třídy X
- Kondenzátory třídy Y (bezpečnostní)

Odrušovací kondenzátory třídy X jsou určeny pro použití tam, kde jejich průraz nemůže ohrozit bezpečnost lidského života. Velikost kapacity kondenzátorů třídy X není omezena a volí se z hlediska konkrétních potřeb při odrušení. Kondenzátory třídy X se dále dělí na podtřídy X1 a X2. Kondenzátory X1 se používají tam, kde je nebezpečí výskytu přepětových špiček větších než 1,2 kV. V případě menších přepětí se užívají kondenzátory X2.

Odrušovací kondenzátory třídy Y se zapojují mezi fázový a ochranný vodič či uzemněný kryt přístroje všude tam, kde je omezena přípustná hodnota unikajícího (svodového) proudu. Mezi živými částmi a ochranným vodičem či krytem přístroje musí být tedy připojen výlučně odrušovací kondenzátor Y o hodnotě nejvýše 10 nF pro svodový proud 0,75 mA a nejvýše 50 nF pro proud 3,5 mA. [B]

Odrušovací filtry

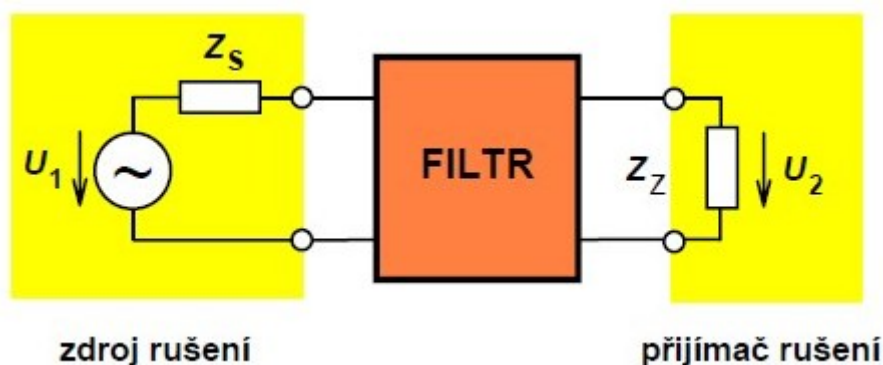
Kombinací odrušovacích tlumivek a kondenzátorů lze získat dokonalejší ochranu před působením vysokofrekvenčního rušení šířícího se po vedení. Této kombinaci zapojení se říká odrušovací filtry. Účelem filtru je snížit velikost harmonického proudu, který teče zpět do napájecí sítě, a tím i zkreslení způsobeného harmonickými napětími. Nejčastěji využíváme filtry typu *LC* (dolní propust), které bez potlačení propouštějí signály (proudy) s kmitočtem nižším než je určitý mezní kmitočet f_m a tlumí kmitočty vyšší, nežli je zvolený mezní kmitočet.

Mezi další druhy odrušovacích filtrů patří *speciální druhy odrušovacích filtrů*. Tyto filtry byly vyvinuty pro ochranu před rušením velké intenzity vf a nf složek, včetně symetrických složek rušení. Proti běžným odrušovacím filtrům mohou mít na svém vstupu zapojeny součástky omezující přepětí (varistory, bleskojistky, ochranné diody). Využití těchto filtrů je u zařízení, které je nutné chránit před přepětovými pulzy a spínacími pochody. Více o speciálních odrušovacích filtrech pro odrušení UPS s frekvenčním měničem bude zmíněno v kapitole 4.3.

Mezi další speciální filtry patří *datové filtry*. Používají se k omezení rušivých signálů na signálových vedeních. Pracují s nižším proudem a napětím a vyznačují se velkou strmostí jejich útlumové charakteristiky.

Sít'ové odrušovací filtry

Jedná se o filtry zapojené do napájecí sítě nebo do vstupu chráněného zařízení. Tento filtr (*LC*, *RC*) lze popsat libovolnou sadou svých čtyřpólových parametrů. Dle níže uvedeného zapojení dvoubranu (filtru) bude určen vložný útlum.



Obr. 18) zapojení odrušovacího filtru jako lineárního dvojhranu [G]

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| \frac{Z_Z}{Z_S + Z_Z} \cdot A_{11} + \frac{1}{Z_S + Z_Z} \cdot A_{12} + \frac{Z_S \cdot Z_Z}{Z_S + Z_Z} \cdot A_{21} + \frac{Z_S}{Z_S + Z_Z} \cdot A_{22} \right|$$

U_2 je napětí na výstupu filtru (na zátěži Z_Z), U_{20} je totéž napětí bez filtru a A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} jsou (komplexní) kaskádní parametry filtru (prvky kaskádní matice $[A]$). Ze vztahu je patrné, že vlastnosti filtru a velikost jeho vloženého útlumu závisí jednak na jeho vlastních parametrech, jednak na impedančních parametrech zdroje i přijímače rušení (tedy např. impedance napájecí sítě Z_S a impedance napájecího vstupu přístroje Z_Z). Případná nesprávná volba hodnot impedancí způsobuje značné obtíže při návrhu síťového odrušovacího filtru. Jedná se o hlavní příčinu vykazování velké odchylky hodnot vloženého útlumu v závislosti na vnějších pracovních (impedančních) podmínkách obvodů, v nichž je zapojen. Rozdíly mezi útlumem filtrů udávaným v katalogích a skutečnými hodnotami měřenými v provozních podmínkách tak mohou dosáhnout až několik desítek dB. [B][G]

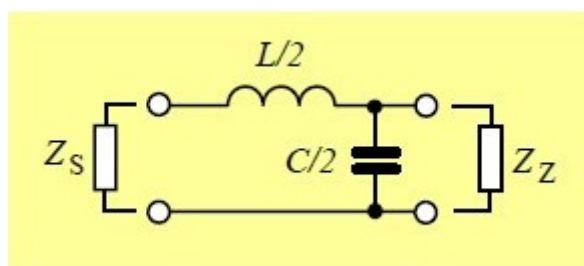
Návrh síťových odrušovacích filtrů musí dále respektovat níže uvedené skutečnosti

- Celková indukčnost tlumivek odrušovacího filtru nesmí být větší než taková, při níž průchodem síťového proudu 50 Hz na nich nevznikne úbytek napětí větší než 1 % až 2 % jmenovité hodnoty napájecího napětí.
- Vložený útlum odrušovacího filtru v nepropustném pásmu s rostoucím kmitočtem teoreticky neustále vzrůstá. V praxi z důvodu parazitních vlastností reálných tlumivek a kondenzátorů je omezováno kmitočtové pásmo a hodnota útlumu filtru. Od určitých kmitočtů, kdy začne převládat parazitní indukčnost kondenzátorů a parazitní kapacita tlumivek, se může původní dolní propust změnit na horní propust, a tím rušení v oblasti vysokých kmitočtů naopak zhoršit. Toto platí zejména při odrušení zařízení velkých výkonů, kdy je značný problém

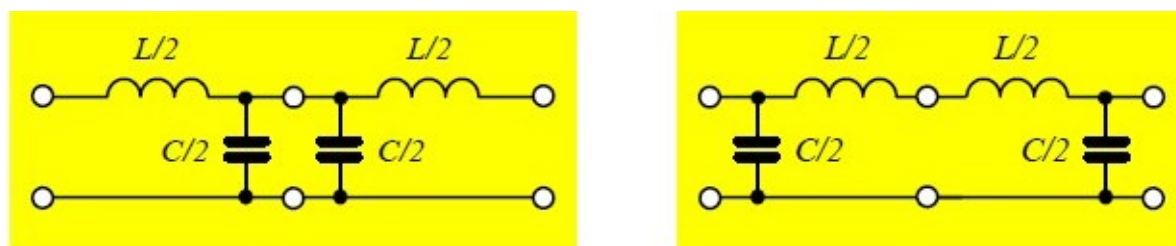
realizovat tlumivky pro proudy 100 A a více s vlastním rezonančním kmitočtem aspoň $1 \div 10$ MHz.

- Použití odrušovacího filtru na energetickém napájecím vstupu zařízení nesmí zhoršit provozní podmínky vlastního zařízení ani napájecí síť nebo ohrozit jejich správnou funkci.
- V neposlední řadě je potřeba myslet na ekonomické a konstrukční otázky. Zejména cena filtru, jeho rozměry a váha. Veškeré tyto veličiny by měly být minimalizovány.

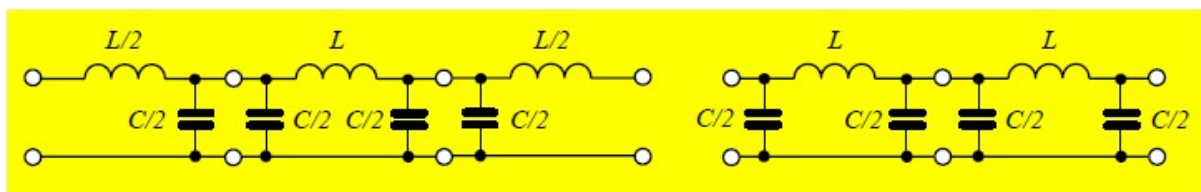
Vzhledem ke všem uvedeným skutečnostem, má každý výpočet síťového odrušovacího filtru spíše orientační charakter. Většina dnes navrhovaných a používaných síťových filtrů LC , je sestavena ze základních Zobelových článků typu L, T či Π a jejich kombinací. Volba vhodného typu článku závisí především na známých či předpokládaných velikostech impedancí připojené sítě Z_S a zátěže filtru Z_Z . [B]



Obr. 19) základní zapojení půlčlánku L – dolní propust [G]



Obr. 20) zapojení článků T a Π [G]

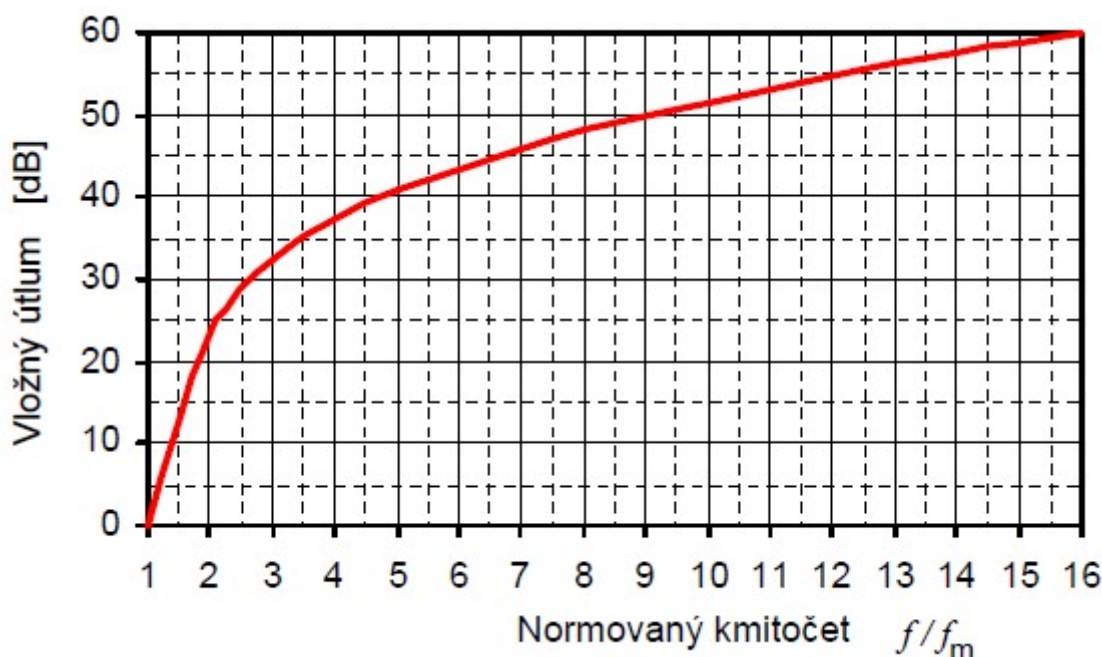


Obr. 21) zapojení dvojitých článků T a Π [G]

Při výpočtech prvků L a C dolních propustí vycházíme z požadavku na mezní kmitočet f_m a velikosti požadovaného vložného útlumu v daném pracovním kmitočtu f . Pro L a C platí:

$$L = \frac{2 \cdot R}{\omega_m} \quad C = \frac{2}{\omega_m \cdot R} \quad \text{kde} \quad \omega_m = \frac{2}{\sqrt{LC}} \quad \text{a} \quad R = \sqrt{\frac{L}{C}} \approx Z_s \approx Z_z \approx 50 \, \Omega$$

Hodnota R se volí přibližně rovná vnitřnímu odporu napájecí sítě a odporu zátěže. Dále pro kmitočet f určíme z níže přiloženého grafu dosažitelnou velikost vložného útlumu základního článku T nebo Π . Pokud z grafu odečtený útlum neodpovídá zadaným požadavkům, je nutné provedení sestavy základních článků (viz obr. zapojení dvojitých článků T a Π výše).



Obr. 22) vložený útlum základních článků T a Π [G]

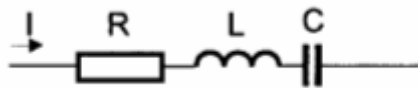
Závěrem lze říci, že pokud zvolíme relativně nízký mezní kmitočet filtru f_m , zvětší se pro zadaný kmitočet f v pásmu nepropustnosti normovaná hodnota f/f_m , a tím vzroste dosažitelný vložený útlum jednoho článku T nebo Π . Důsledkem je menší počet základních článků pro dosažení potřebného útlumu filtru. Nutno však uvést, že při nízké hodnotě f_m vycházejí příliš vysoké potřebné hodnoty indukčnosti L a kapacity C filtru. Kromě obtížné technické realizace, by takové odrušovací součástky mohly rušivě působit na napájecí síť a zátěž při pracovním kmitočtu napájecí sítě 50 Hz. Nemá-li např. na sériově zapojených tlumivkách ve filtru vznikat větší úbytek napájecího napětí než 1 % jeho jmenovité hodnoty, nesmí jejich celková reaktance při kmitočtu 50 Hz přesáhnout 1 % impedance zátěže Z_z na tomto kmitočtu. Podobně celková susceptance paralelně spojených kondenzátorů filtru nesmí při 50 Hz přesáhnout 1 % hodnoty vodivosti zátěže $1/Z_z$ při tomto kmitočtu.

Z těchto uvedených důvodů neurčitosti návrhu odrušovacích filtrů, je vždy třeba po předběžném výpočtu a realizaci vyzkoušet navržený filtr pro konkrétní zařízení a podle výsledků měření provést potřebné úpravy. Tento postup je vhodné zvolit i při použití filtru vybraného z katalogu výrobce. [B]

Sériové rezonanční obvody – pasivní filtračně kompenzační filtr

Odrušení harmonických napětí a proudů lze řešit sériovými rezonančními obvody, které jsou naladěny vždy pro příslušnou harmonickou. Základem filtru je RLC rezonanční obvod, připojený do určitého místa v elektrickém rozvodu. U těchto obvodů je pro frekvence blízké základní harmonické obvod téměř kapacitní a tyto obvody současně pracují jako kompenzace účinníku. Pro tyto obvody je důležitým parametrem pracovní kmitočet f_n a rezonanční kmitočet f_r . Vlastní funkce obvodu spočívá v tom, že při rezonanci má sériový rezonanční obvod malý odpor a požadované frekvence harmonických proudů jsou zkratovány k zemi. Pro frekvence nižší než harmonické, má filtr kapacitní charakter a pro frekvence vyšší nežli rezonanční, má obvod induktivní charakter.

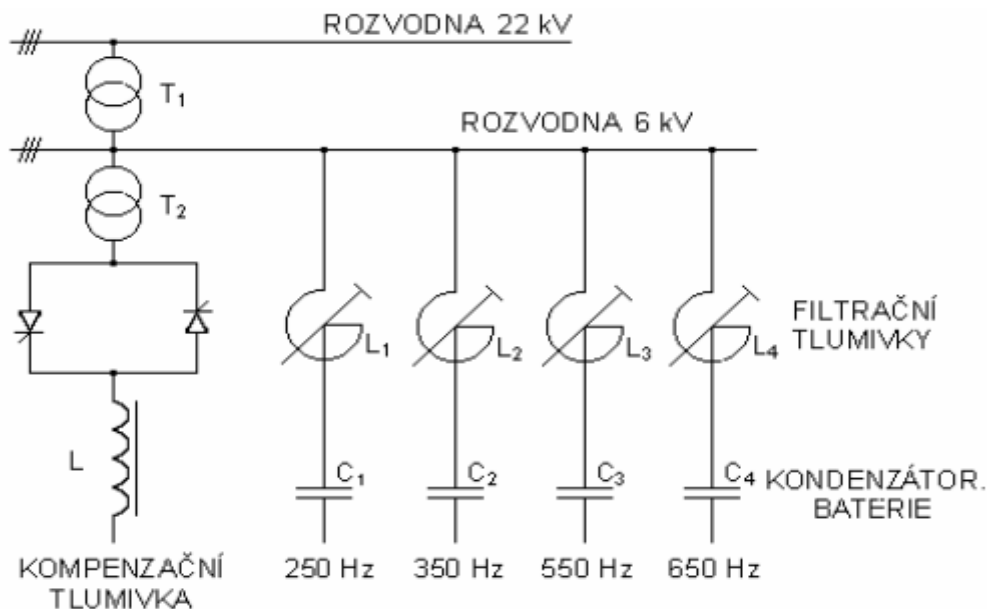
Impedance těchto obvodů je dána vztahem:

$$Z = R + j\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right) \quad \Omega$$


Obr. 23) sériový rezonanční obvod [I]

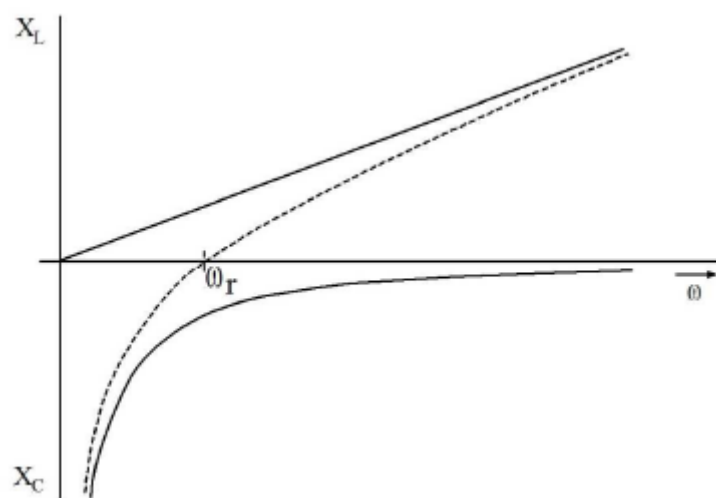
Problém, který může nastat při využití více sekcí laděných sériových obvodů, je vznik paralelních rezonancí mezi vlastními sériovými rezonančními obvody a reaktancí sítě. Tato rezonance nastává při rovnosti admitancí kapacit a indukčností a impedance obvodu dosahuje nejvyšších hodnot. Pokud bude rezonanční frekvence blízká či shodná kmitočtu některé harmonické proudu emitovaného rušící zátěží, může napětí dané harmonické růst a výrazně deformovat napětí v místě připojení zátěže k síti. To může způsobit rušení zařízení a systému zapojených v této napájecí síti. Pokud se kompenzačním kondenzátorům předřazují ochranné tlumivky, měl by být rezonanční kmitočet takového obvodu nižší, nežli nejmenší harmonická frekvence proudu rušící zátěže. Dodržením této podmínky, je takto naladěný LC obvod pro veškeré harmonické čistě induktivní a nedochází k paralelní rezonanci s reaktancí sítě. Z důvodu možného vzniku paralelních rezonancí,

se nedoporučují používat filtračně kompenzační filtry tam, kde je možný velký výskyt spojitého spektra harmonických.

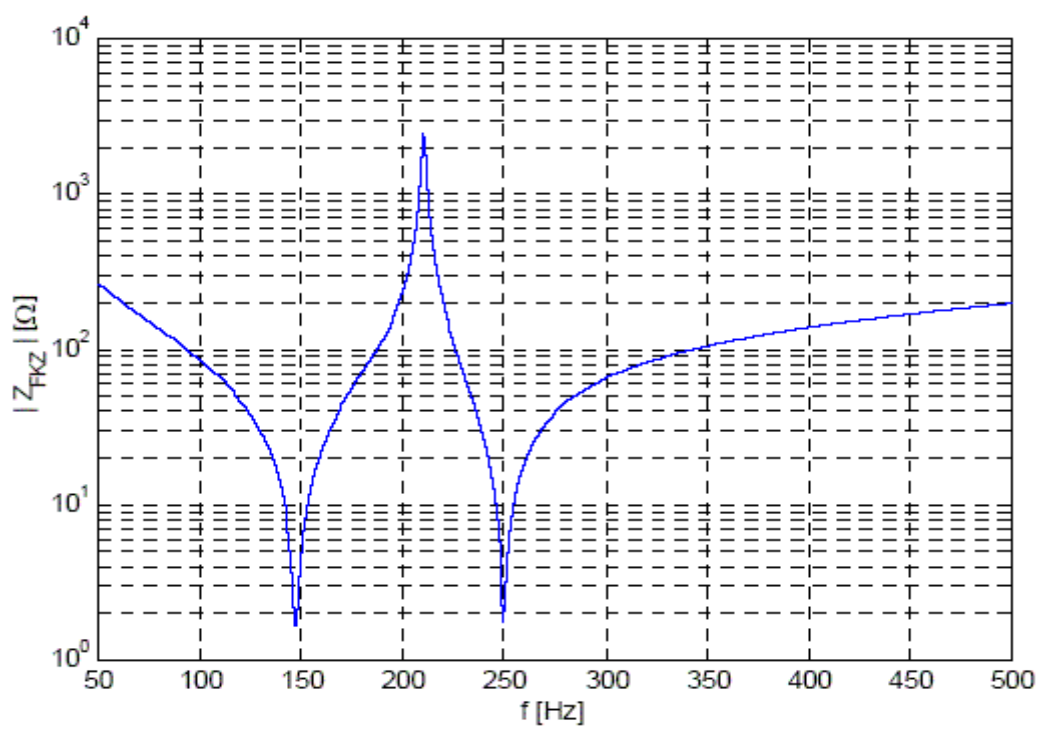


Obr. 24) příklad filtračně kompenzačního filtru [I]

Na výše uvedeném obrázku lze vidět příklad filtračně kompenzačního filtru. Tyto obvody jsou konstruovány především pro kompenzaci jalového proudu, která se provádí vložením tlumivky s fázově řízeným tyristorovým spínačem v antiparalelním zapojení. Toto zapojení umožňuje měnit čistě induktivní proud od nulových hodnot až do maximálních hodnot impedance tlumivky. Pro řízení kapacitních proudů jsou využity vždy kondenzátory zapojené pro příslušnou harmonickou. Pro základní harmonickou mají totiž kapacitní charakter a jsou tedy prostředkem pro kompenzaci účinníku. V případě využívání spínání jednotlivých LC sekcí, je důležité dodržovat pořadí připínání těchto sekcí do napájecí sítě. Stupeň naladěný na nejnižší rezonanční kmitočet odpínat jako poslední a připínat jako první. Pokud nebude toto dodrženo, může pro harmonické nižších řádů, které ještě nejsou eliminovány zapojením filtru, představovat vyšší stupeň kapacitní reaktanci. Díky této reaktanci, může dojít k nežádoucí paralelní rezonanci s reaktancí sítě. Tato rezonance způsobí, jak již bylo výše uvedeno, zvýraznění některé harmonické složky napětí a deformaci napětí v místě připojení spotřebiče. Tím dojde ke zvýšení rušení ostatních spotřebičů.



Obr. 25) kmitočtová charakteristika kompenzačního filtru [L]



Obr. 26) impedanční charakteristika kompenzačního filtru pro 3. a 5. harmonickou [L]

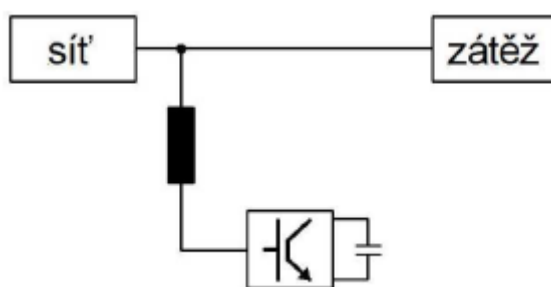
Plynule řízené aktivní filtry

Aktivní filtry jsou paralelně nebo sériově zapojené generátory řízené vhodným regulačním systémem. Jsou konstruovány tak, aby i v dynamických stavech byla zajištěna požadovaná kompenzace nevhodných harmonických složek. Dle způsobu zapojení aktivního filtru do sítě pak lze vylepšit proud, napětí nebo obojí. Aktivní filtry dělíme na paralelní (derivační), sériové a kombinované. Paralelní aktivní filtry upravují vlastnosti sítě směrem od zátěže ke zdroji a sériové filtry upravují síť směrem od napájecí strany ke spotřebiči. [I]

Paralelní aktivní filtr

Tyto filtry jsou tvořeny generátory proudu, které jsou zapojeny paralelně k zátěži. Odstraňují nežádoucí harmonické proudy generováním shodné složky opačného směru a zavádí je do sítě. Takto je filtrovaný odebíraný síťový proud a současně dochází k úpravě deformace napětí způsobené zátěží. Tímto způsobem lze v každém okamžiku provádět kompenzaci podle okamžitého výskytu harmonických složek bez nebezpečí výskytu nežádoucích rezonancí. Tyto filtry jsou schopny generováním jalové složky první harmonické provádět rychlou kompenzaci jalového proudu, nebo pomocí sousledných a nesousledných složek upravovat nesymetrickou zátěž na symetrickou.

Generátor proudu nebo napětí bývá tvořen můstkovým zapojením IGBT tranzistorů. Jedná se o zapojení s šesti spínači a zdroje napětí či proudu pro třífázové provedení. V praxi se nejvíce osvědčuje typ s napětíovým zdrojem tvořený kondenzátory. Spínání tranzistorů však s sebou přináší obsah harmonických v oblasti spínacích kmitočtů (v řádech kHz) a je tedy nutné tyto filtry vybavit pasivními filtry zapojenými jako dolní propust.

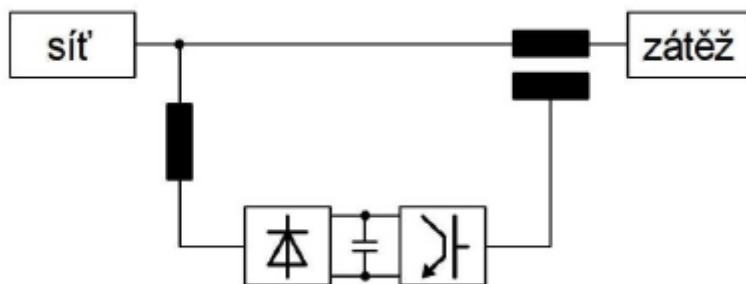


Obr. 27) paralelní aktivní filtr a jeho připojení do sítě [I]

Ze zapojení je zřejmé, že tento filtr je zdrojem proudu, který je přičítán do společného uzlu obvodu. Je přičítána taková hodnota proudu, aby výsledná hodnota harmonických proudů byla minimální a docházelo ke kompenzaci deformačního výkonu. [J]

Sériový aktivní filtr

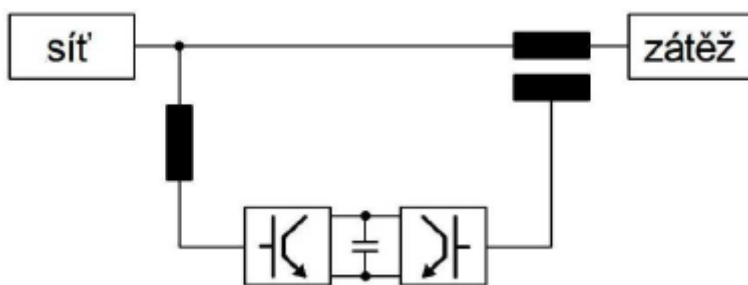
Sériové filtry jsou tvořeny generátory napětí zapojenými mezi svorky sítě a spotřebiče. Dochází k úpravě přiváděného napětí na požadovaný tvar oproti paralelnímu filtru, kde dochází k úpravě proudu. Těmito filtry lze dosáhnout udržení amplitudy napětí, odstranění harmonických, kompenzace špiček a poklesů, zajištění symetrického rozložení napětí. [J]



Obr. 28) sériový aktivní filtr a jeho připojení do sítě [I]

Kombinované aktivní filtry

Výše uvedené filtry lze zkombinovat v jeden celek. Výsledný filtr zajistí definovaný odběr proudu a vhodné napětí v místě připojení filtru. Využití nalezneme u kondicionérů větších výkonů, kde v kombinaci s vyšší kapacitou akumulované energie výrazně méně ovlivňují síť směrem ke zdroji elektrické energie. Tyto kondicionéry umožňují regulaci výstupního napětí i pod hodnotu vstupního napětí, tedy při přepětí. [J]



Obr. 29) kombinovaný aktivní filtr a jeho připojení do sítě [I]

2.4.6. Vliv filtrů na signál HDO

Signály HDO jsou z hlediska nízkofrekvenčního rušení nežádoucí. Úroveň těchto signálů, které jsou i několikrát za hodinu superponovány na základní vlnu síťového napětí, mohou při rezonancích v některých místech sítě dosahovat i nedovolených mezí. Signál HDO je používán k přepínání nízkého a vysokého tarifu, připojování různých zařízení k síti, spínání veřejného osvětlení atd. V České republice jsou signály HDO superponovány na základní kmitočet 50 Hz s frekvencí 183,33 Hz, 216,66 Hz, 283,33 Hz 760 Hz a 1060 Hz. Nejčastěji je využívána frekvence 216,66 Hz. Frekvence signálu HDO nesmí být filtrovány či vyrušeny filtračními (kompenzačními) prvky. Tyto signály však přináší zmíněné rezonance, které vznikají instalací chráněných či nechráněných kompenzací.

Projevy rezonancí se signály HDO:

- Podstatné zvýšení procentní úrovně signálu HDO v hlavních přípojnicích 6 kV oproti hladině 110 kV.
- Zvýšené odsávání signálu HDO z hladiny 110 kV s následkem přetěžování kompenzačních zařízení.
- Zvýšená úroveň signálu HDO na hladině 6 kV s přenosem do nízkého napětí (blikání světel, výpadky UPS a řídicích systémů, zvýšení hlučnosti kompenzačních zařízení).

Tyto vlivy lze odstranit filtrem HDO. V podstatě jde o zatížení signálu HDO a tím dojde k omezení měkké nakmitané složky signálu HDO na přípojnicích 6 kV. Účinnost filtrů je omezena jakostí použitých tlumivek a v žádném případě nedochází k úplnému potlačení signálu HDO. Na úrovni 110 kV je filtru HDO předřazen hlavní transformátor 110/6,3 kV, který způsobuje pokles rezonančního kmitočtu celého obvodu, takže na hladině 110 kV nenastává sériová rezonance na kmitočtu HDO. [J]

3. Popis napájecí sítě telefonní ústředny Dolů Bílina

3.1. Útvar ICT Doly Bílina, oddělení technické podpory

Severočeské doly a.s. jsou těžební společnost, zabývající se povrchovou těžbou hnědého uhlí. Tato společnost je rozdělená na dvě těžební lokality, které jsou od sebe vzdáleny zhruba 50 km. Jedná se o lokalitu Bílina, nazývanou Doly Bílina a lokalitu Tušimice, nazývanou Doly Nástup Tušimice. V této kapitole bude pojednáno o útvaru informačních a komunikačních technologií SD a.s. a popsána napájecí síť telefonní ústředny Dolů Bílina.

Jelikož jsem zaměstnancem této společnosti a pracuji jako vedoucí oddělení technické podpory útvaru ICT, budou uvedené informace v této kapitole čerpány především z vlastní praxe získané v této společnosti.

Telekomunikační středisko, od roku 2012 již útvar ICT, bylo jako objekt telefonní ústředny vybudováno v roce 1989. Zpočátku bylo využíváno výhradně jako telefonní ústředna, avšak s dalšími požadavky dolu a sloučením střediska telekomunikací s útvarem informačních technologií, se začala telefonní ústředna rozšiřovat o další elektronické systémy.

Důležitou částí oddělení technické podpory DB, je telefonní ústředna MD110, složená z šesti LIMů, z nichž čtyři jsou umístěny na centrálním sále ústředny a dva na vzdálených pracovištích. Ústředna MD110 byla pořízena v roce 1991 a poskytuje možnost analogové, digitální i IP telefonie. V roce 2010 byla up-gradována na verzi BC13. Nutno podotknout, že přes relativní stáří tohoto zařízení, lze dnes běžně dokoupit nový hardware do stávajících LIMů a tím dále rozšiřovat stávající systém. Od roku pořízení pracuje tato ústředna i s původními napájecími zdroji, u kterých byl řešen pouze problém s vadným spínačem na elektronické pojistce. K telefonní ústředně jsou dále přiřazeny systémy, které umožňují sledovat hovory směřující mimo telefonní síť SD a umožňují provádět shromažďování dat, potřebných pro následné vyúčtování jednotlivých hovorů externích firem a zaměstnanců SD. V rámci zkvalitnění služeb, je ústředna vybavená externím systémem hlasové pošty, pro záznam hovorů v době nepřítomnosti uživatele u telefonního přístroje. Tato zařízení jsou součástí centrálního sálu ústředny.

Potřeba nutnosti komunikace se zaměstnanci v místech, kde nelze provozovat klasické telefonní spojení, si vyžádala v roce 1996 vybudování radiové sítě Ericsson MRS 5000. Řídící a vyhodnocovací prvky tohoto systému jsou umístěny taktéž v centrálním sále telefonní ústředny. Systém Ericsson MRS 5000 se skládá z 8 základnových stanic, které jsou umístěny v prostorách lomu. Jedná se o dvě stanoviště, vždy po 4 základnových stanicích. Tento systém pracuje v pásmu VKV

na frekvenci 164 - 168 MHz. Vybudování této sítě s sebou přineslo i nutnost monitoringu a záznamu provozu sítě. Tato zařízení jsou umístěny také na centrálním sále telefonní ústředny.

Jelikož v roce 2009 došlo ke krachu dodavatelské společnosti Radius Sweden AB, bylo nutné řešit náhradu současného analogového systému Ericsson. V současné době dochází k budování a testování nového digitálního radiového systému Motorola. Tento systém pracuje opět v pásmu VKV na frekvencích 164 – 168 MHz a využívá 4 uvolněné základnové stanice systému Ericsson. Řídící a vyhodnocovací prvky tohoto systému jsou umístěny také v centrálním sále telefonní ústředny. Oba systémy budou udržovány v souběhu do doby úplného nahrazení systému Motorola za Ericsson. Výhledově lze říci, že se jedná o dobu cca 3 let.

Útvar ICT DB dále udržuje kamerový systém, který je složen z 270 ks kamer a 5 ks výkonných serverů, které jsou umístěny v nově vybudované serverovně v objektu TÚ. Další 4 lokální kamerové servery jsou umístěny dle potřeb v provozech DB.

Po sloučení střediska telekomunikací s IT, došlo k rozšíření činností tohoto oddělení. V současné době oddělení technické podpory útvaru ICT, sídlící v objektu telefonní ústředny DB, dále udržuje hardwarové prvky a sestavy PC, přístupové systémy a datové sítě. V návaznosti na rozšíření činností, došlo k navýšení počtu zařízení, které řeší dohled nad uvedenými aplikacemi. Tyto zařízení jsou opět umístěny v objektu telefonní ústředny.

Výše uvedené, jsou hlavní systémy a činnosti patřící pod středisko technické podpory útvaru ICT DB. Samozřejmě, že tato zařízení se neobejdou bez 2U stojanů zaplněných nejrůznějšími sloty pro optické kabely, PCM převodníky, modemy, switche, zdroje, atd.

Tyto uvedené systémy, však nelze provozovat bez elektrické energie. Jelikož je dnes u každého jmenovaného systému požadovaný chod i při výpadku napájení objektu telefonní ústředny, jsou veškerá tato zařízení zálohována pro krátkodobé výpadky UPS systémy. [A]

3.2. Napájecí síť telefonní ústředny Doly Bílina

3.2.1. Historie

V době výstavby telefonní ústředny byl pro tento objekt navržen přívod elektrického proudu kabelovým vedením 400 V, provedení AYKY 4Bx50 mm² z blízké trafostanice TR1. Pro případné krátkodobé výpadky proudu, byly některé systémy centrálního sálu do roku 2009 zálohovány

jednotlivými UPS záložními zdroji. Celkem se jednalo o 6 kusů UPS rozdílných výrobců a různých výkonových rozsahů. Na jednotlivých UPS zdrojích byly zaznamenávány dva hlavní problémy.

Mezi hlavní problém patřila životnost akumulátorů. Protože se jednotlivé záložní zdroje pořizovaly vždy v době instalace nového zařízení nebo systému, nebyla doba pořízení těchto UPS zdrojů jednotná. Tím pádem, vzhledem k rozdílnému stáří akumulátorů, vykazovaly UPS různé hodnoty kapacity a doby dodávek elektrického proudu. V případě výpadků elektrické energie, nebylo možné určit přesnou dobu chodu jednotlivých zařízení. Byla absence centrálního informačního ukazatele o stavu záložní energie v akumulátorech a zbývajících době chodu na záložní systém. V případě realizace obměny vadných akumulátorů, se mnohdy cena originálního akumulátoru blížila pořizovací ceně nové UPS.

Druhým vážným problémem se stala vybavovací doba starších UPS. Jelikož většina těchto UPS nedokázala napájet v provozu ON-line, staly se častým problémem krátkodobé podpětí, které starší UPS zdroje nedokázaly rychle vyhodnotit. Zařízení na těchto záložních zdrojích často vypínaly v době, kdy probíhaly důležité relace, někdy i s následkem nemožnosti opětovného spuštění zařízení.

Tyto dva hlavní problémy se staly podnětem k vybudování centrálního záložního systému pro krátkodobé výpadky proudu a napěťové špičky. V roce 2009 byla pořízena centrální ON-line UPS stanice. Po zvážení veškerých technických podmínek a parametrů, byla vybrána UPS od firmy GE Digital Energy. Jednalo se o model GE VH 1500, který je osazen akumulátorem o kapacitě 9 Ah a dvěma akumulátorovými boxy VH Series. Každý akumulátorový box má kapacitu 14 Ah. Celková kapacita pořízené UPS sestavy tedy činí 37 Ah.

V případě dlouhodobého výpadku byla ústředna vybavena motorgenerátorem Honda EZ 2200 s parametry 2,0 kW/230 V. Jeho výkon se však z důvodu přibývání nových a energeticky náročnějších systémů stal nedostatečný a v roce 2007 byla proto pořízena nová výkonná třífázová elektrocentrála GENMAC Combiplus 7800RE s parametry 6,4 kW/400 V a 5,0 kW/230 V. Tento záložní zdroj byl uváděn do chodu obsluhou, pomocí elektrického startéru nebo pomocí startovacího lanka. Elektrocentrála byla schopna dodávat již více elektrické energie než první stupeň záložního systému (UPS) a bylo tedy možno zabezpečit kompletní dlouhodobé napájení veškerých systémů v objektu telefonní ústředny.

V případě dlouhodobého výpadku proudu, nemělo středisko telekomunikací vybudovaný žádný systém, který by automaticky přepnul první stupeň zálohy (UPS) na druhý stupeň záložního napájení (elektrocentrálu). [A]

3.2.2. Současný stav

Jak již bylo dříve uvedeno, došlo v roce 2012 ke sloučení střediska telekomunikací a útvaru informačních technologií. Tímto sloučením došlo k navýšení počtu sdělovacích a výpočetních systémů v objektu telefonní ústředny. Veškerá tato nová zařízení využívají stávající elektrickou síť a jako záložní systém pro případ výpadku elektrické energie využívají vlastní UPS systémy.

Přírůstek těchto nových zařízení s sebou přinesl dva negativní vlivy. Prvním z nich je vliv UPS systémů na napájecí síť. V objektu TÚ je vybudována nová serverovna, kde jako krátkodobé záložní napájení slouží 2x ON-line UPS APC3000 o výkonu 2,7 kW a 1x ON-line UPS APC2200 o výkonu 2,0 kW. Již před instalací těchto nových UPS, byla dle měření přístrojem Chauvin Arnoux C.A 8352 Power Quality Monitor, napájecí síť telefonní ústředny ovlivněna výrazným rušením, respektive harmonickými vyšších řádů. Tento stav mohl být způsoben již instalovanou UPS GE VH1500 o výkonu 1,1 kW a jednotlivými UPS pro zálohování osobních a systémových PC. Pro tyto účely jsou využívány 3x UPS APC Smart 620, 1x UPS APC CS500 a pro kamerový systém 2x UPS APC SMX750.

Druhý negativní vliv, který je způsoben navýšením počtu elektronických zařízení v objektu telefonní ústředny, je nedostatečný výkon instalované elektrocentrály GENMAC Combiplus 7800RE s parametry 6,4 kW/400 V a 5,0 kW/230 V. Jelikož spotřeba veškerých systémových zařízení se pohybuje na příkonu 8 kW pro třífázový provoz, je nutné řešit nákup výkonnější elektrocentrály. V době výpadků elektrické energie, již není možné spustit současnou elektrocentrálu GENMAC bez odstavení některých důležitých zařízení. V současné době je již řešena výstavba nového objektu pro výkonnější elektrocentrálu 30 kW/400 V, která již bude vybavena startovací automatikou. Tato elektrocentrála pokryje již kompletní spotřebu elektrické energie budovy.

Stávající dimenzování přívodního vedení pro objekt telefonní ústředny lze považovat za dostatečný i vzhledem k nárůstu spotřeby elektrické energie. Je vyřešena i rezervní napájecí kabelová trasa, taktéž z místní trafostanice TR1. Přívod je proveden shodným způsobem, tj. kabelovým vedením 400 V, provedení AYKY 4Bx50 mm². Přepínání mezi hlavním a rezervním přívodem je zajištěno ve venkovním pilíři PR17.1 a je automatické. [A]

Veškerá stávající zařízení umístěná na hlavním sále telefonní ústředny nebyla ovlivněna sloučením střediska telekomunikací s IT. Nově instalované zařízení a systémy jsou instalovány převážně v nové serverově a v ostatních místnostech objektu. Tímto nedošlo k narušení krátkodobého zálohování hlavního sálu telefonní ústředny prostřednictvím UPS záložního systému od firmy GE Digital Energy, UPS GE VH1500.

4. Vliv UPS na harmonické v napájecí síti telefonní ústředny

4.1. Typy UPS zdrojů

Zkratku UPS (Uninterruptible Power Supply) lze přeložit jako *zdroj nepřerušitelného napájení elektrickou energií*. Tyto zdroje napájení se používají tam, kde nekvalitní napájecí síť s výskytem harmonických, vř rušivých proudů a napětí, s výskytem přepětí či podpětí, kolísání napětí s jeho úplným výpadkem může ohrozit běžnou činnost připojených zařízení k síti. UPS systémy se skládají z akumulátorů, potřebné řídicí elektroniky, frekvenčního měniče s pulzně šířkovou modulací a výstupní výkonové elektroniky. Veškeré tyto prvky jsou vždy vloženy do společného boxu. Vyrábějí se varianty jednofázové, třífázové, pro venkovní prostředí s potřebným krytím, stacionární, přenosné, atd. UPS fungují na principu DC/AC měniče napětí s vestavěným akumulátorem. Zálohovaný spotřebič je připojen k UPS a UPS je připojena k síti 230V, případně 400 V. Pokud není dodávka elektřiny ze sítě přerušena, je zdroj UPS udržován ve stavu nabíjení. Doba, po kterou UPS udrží zařízení v chodu, je dána kapacitou akumulátorů a proudovým odběrem zálohovaných zařízení. Běžně se pohybuje se v řádech minut až po několik hodin. Pro zvýšení kapacity UPS systémů lze realizovat rozšíření hlavní UPS bateriovými boxy (batterypack), až k hodnotám povolených výrobcí zařízení. Kromě zajištění zálohovaného napájení spotřebičů, jsou UPS systémy schopny taktéž eliminovat napěťové špičky v síti, překlenout mžikové výpadky sítě, rušení v síti atd.

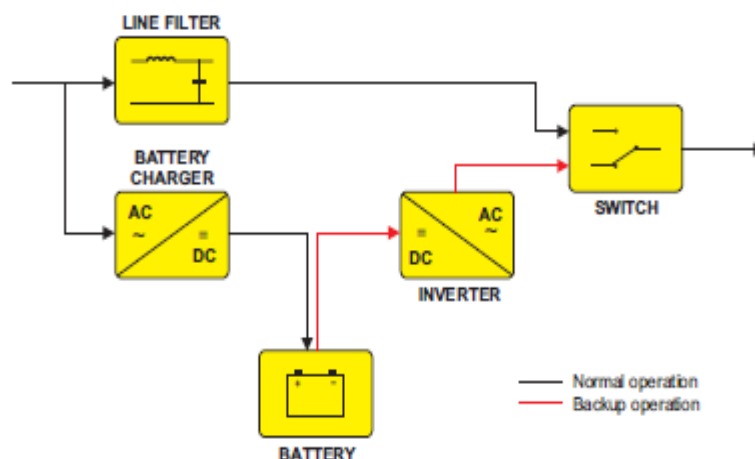
Mezi hlavní parametry udávaných u systémů UPS je výkon. Výrobce může udávat tzv. skutečný výkon, který je uváděn ve watech (W), nebo častěji uváděný zdánlivý výkon ve voltampérech (VA). [A]

Pracovní režimy UPS

UPS zdroje mohou dle normy EN 62040-3 pracovat ve třech režimech, OFF-line, LINE-interactive a ON-line.

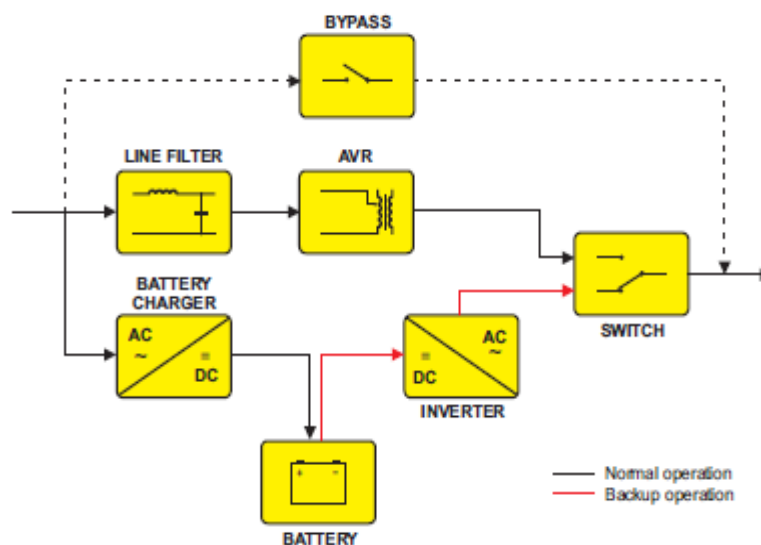
Nejjednodušším typem záložních zdrojů jsou UPS typu **OFF-line** (VFD-voltage and frequencydependent). Spotřebič je napájen přes UPS i v bezporuchovém stavu, ale v tuto dobu není aktivní měnič a je využíváno napájecí napětí sítě. Parametry sítě jsou upravovány pasivními filtry. Jednoduché filtry však neodstraní veškeré anomálie v rozvodné síti. V případě výpadku elektrické energie, dojde k přepnutí pomocí relé na měnič napájený z akumulátorů. Toto přepnutí probíhá zhruba

do 10 ms, dle typu UPS. Měníč vytváří výstupní napětí lichoběžníkového (trapézového) tvaru. Tento režim je tedy vhodný volit pro zařízení, která jsou schopna překlenout výpadek v délce tohoto času. [A]



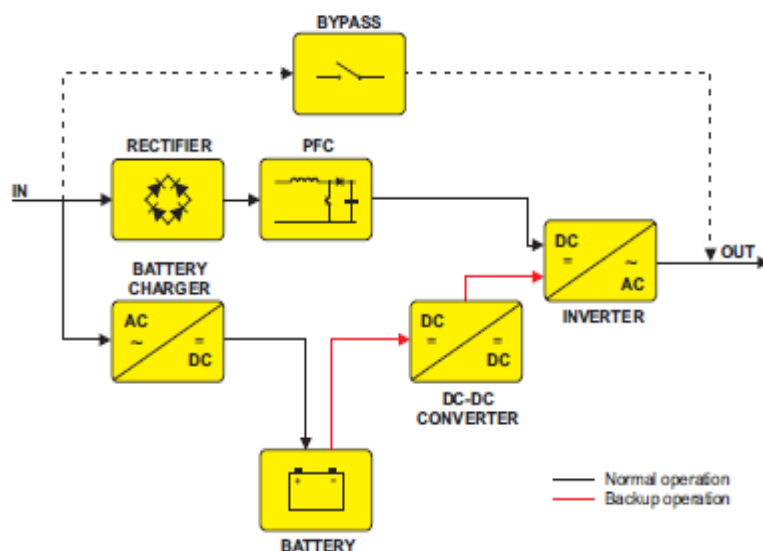
Obr. 30) blokové schéma UPS pro režim OFF-line [A]

V režimu **LINE-interactive** (VI-line interactive) dochází k nižšímu opotřebení akumulátorů proti režimu OFF-line z důvodu použití regulačního transformátoru, který je schopen vyrovnat krátkodobé přepětí, podpětí a rázy v síti. Tímto je zabráněno nadměrnému zatěžování akumulátoru. U tohoto režimu však dochází také ke krátkodobému přerušení napájení při přepínání na akumulátory. Jedná se zhruba o 10 ms dle typu UPS. Nejdokonalejší UPS tohoto typu mají plynulé řízení výstupního napětí a bezspínákový přechod mezi sítovým a bateriovým režimem. [A]



Obr. 31) blokové schéma UPS pro režim LINE-interactive [A]

Nejkvalitnějším typem zálohových zdrojů UPS je typ **ON-line** (VFI-voltage and frequency independent). Zajišťuje napětovou a frekvenční nezávislost ve všech režimech (síťový i bateriový). Tyto UPS pracují na principu dvojité konverze či jako jednokonverzní. Zdroje s dvojitou konverzí jsou nejrozšířenějším typem. Pracují tak, že se vstupní síťové napětí nejprve usměrní řízeným usměrňovačem a následně se rozstřídá v invertoru na výstupní sinusové napětí o přesném kmitočtu 50 Hz. Invertor je tedy trvale v provozu. Tento princip přináší dobrou stabilitu výstupního napětí i při změnách vstupního napětí, zatížení, pulzním přepětí, vř. rušení a neharmonickém zkreslení apod. Tento režim tedy zajišťuje napájení nezávisle na stavu síťového napětí či kolísání frekvence. Vstupní usměrňovače bývají u nižších výkonů řešeny pomocí spínaných tranzistorů s obvodem PFC (Power Factor Correction). Pro vyšší výkony je usměrňovač řešen pomocí tyristorů. Pokud jsou kladeny požadavky na minimální zkreslení vstupního proudu, jsou zdroje vybaveny dvanáctipulzním usměrňovačem či speciálními filtry. Tyto typy UPS jsou však cenově náročnější. [A]



Obr. 32) blokové schéma UPS pro režim ON-line [A]

Porovnání UPS ON-line jednokonverzních a s dvojkonverzních

Jelikož se jedná o velice obsáhlou problematiku, kterou lze svým rozsahem začlenit do samostatného projektu či závěrečné práce o záložních UPS systémech, budou zde uvedeny pouze výsledné přednosti obou variant.

Jednokonverzní UPS

- Systém má vysokou celkovou účinnost, protože energie není dvakrát konvertována. Výsledné ztráty se pohybují v rozmezí 3-6 %.
- Výstupní napětí je sinusového průběhu a vstupní tlumivka je lineární prvek, je i proud odebíraný ze sítě vždy sinusový.
- UPS působí jako obousměrný filtr.
- Možnost postupného zatěžování generátorů při opětovném připojení UPS (UPS se nechová jako skoková zátěž).
- Jednokonverzní UPS splňují požadavky na UPS typu ON-line, přičemž jsou odstraněny hlavní nevýhody UPS s dvojitou konverzí, tj. zarušení vstupní sítě vyššími harmonickými a velké vnitřní ztráty.

Dvojkonverzní UPS

- Konstantní účinnost v celém rozsahu vstupního napětí a zatížení, nezávislá na typu zátěže, nezávislá na charakteru zátěže.
- Kvalitnější řízení a nabíjení baterií (delší životnost).
- Nasazení i do nekvalitních sítí s neharmonickým vstupním napětím.
- Větší rozsah vstupního napětí a frekvence.

[H]

4.2. Vlastnosti UPS zdrojů

Jednotlivé vlastnosti UPS jsou shodné pro veškeré známé typy UPS, avšak jejich jednotlivé parametry vlastností se liší dle vnitřního zapojení. Všeobecně u UPS sledujeme tyto vlastnosti:

- *Vyšší harmonické vstupního proudu* – vliv UPS na elektrickou síť z důvodu odběru neharmonického proudu.
- *Creshfactor (činitel výkyvu)* - je to poměr mezi maximální a efektivní hodnotou střídavé veličiny. Pro čistý sinusový průběh je jeho hodnota 1,414 ($\sqrt{2}$). Některá elektronická zařízení, jsou schopna pracovat i s hodnotou zkreslení výrazně vyšší (např. 3). Jedná se nejčastěji o síťové zdroje počítačů.
- *Přetížitelnost* – existuje několik druhů přetížitelnosti. Jedná se především o velikost maximálního špičkového proudu, který je zdroj UPS schopen trvale dodávat. Dalším druhem

je špičkový výkon, který je dodáván bez omezení výstupního napětí. Dále se udává zkratový proud invertoru a doba chodu invertoru při úplném zkratu. Posledním údajem je přetížitelnost bypassu. Tento údaj je udáván z důvodu ochrany elektronických prvků bypassu (tyristory).

- *Tvar křivky výstupního napětí* – u zdrojů malého výkonu se vyskytují různé tvary výstupního napětí. Řešíme dle požadavků připojené zátěže na výstup UPS.

[A][H]

Vlastnosti UPS typu OFF-line

U těchto UPS je tvar vstupního proudu (vyšších harmonických) dán převážně zátěží na výstupu UPS. Creshfactor není nutný u těchto jednoduchých záložních zařízení uvádět, protože při chodu z akumulátorů není vytvářeno kvalitní sinusové napětí. Přetížitelnost střídače se v praxi příliš neuplatňuje, protože zátěž je trvale připojena na elektrickou síť. Problém může nastat při zapínání a vypínání spotřebiče s vysokým záběrovým proudem při chodu z akumulátorů, čímž může dojít k přetížení střídače. Tvar křivky výstupního napětí je vzhledem k jednoduchosti zařízení a nízké ceně volen tak, aby byla dosažena snadná elektronická úprava výstupního tvaru napětí.

Vlastnosti UPS typu Line-interactive

Zdroje s touto architekturou jsou náročnější modifikací zdrojů OFF-line. Většina vlastností je tedy shodná s tímto typem UPS. U výstupního napětí je dosaženo větší stability nežli u napětí vstupního a také výstupní napětí při chodu z akumulátorů má kvalitnější sinusový tvar.

Vlastnosti UPS jednokonverzních

Tyto měniče mají dobrý tvar vstupního proudu. Je však potřeba rozlišit měniče první generace a měniče s delta konverzí. U první generace existoval vždy fázový posun mezi vstupním a výstupním napětím a vstupním proudem a napětím. UPS s delta konverzí je již tento fázový posun odstraněn. U těchto UPS se potýkáme se dvěma problémy. Prvním z nich je svázání vstupního a výstupního kmitočtu, který musí být vždy shodný. Druhým problémem je nerovnoměrné zatížení trojfázového systému UPS a znamená, že nulovým vodičem se neuzavírá proud mezi výstupem UPS a zátěží, ale je odebírán ze sítě. Výsledné vlastnosti jednokonverzních systému jsou velice závislé na vnějších okolnostech (např. velikost napájecího napětí), nežli u jiných konstrukcí a je třeba vycházet z celého komplexu technických vlastností a možných provozních stavů.

Vlastnosti UPS dvojkonverzních

Pokud nebudeme uvažovat chod UPS přes bypass, bude tvar vstupního proudu ovlivněn typem usměrňovače. Tyto usměrňovače se současně chovají jako filtry harmonických, případně kompenzátory účinníku. Nejčastěji se využívají fázově řízené tyristorové usměrňovače, které se liší především průběhem vstupního proudu. Velký význam u dvojkonverzních UPS má creshfactor, jelikož je zátěž neustále napájena ze střídače a trvalé překročení hodnot creshfactoru má za následek trvalé zkreslení výstupního napětí. Moderní střídače jsou již konstruovány i pro chod při vysokých hodnotách creshfactoru, s dodávkou vysokých hodnot okamžitého proudu, se zatížitelností např. typu počítačových zdrojů, kde je zátěž až o 50 % vyšší, nežli u lineárních zátěží. Přetížitelnost trvale běžících střídačů je poměrně nízká. Z těchto důvodů jsou většinou tyto UPS vybavovány bypassem. Ten je tvořen nejčastěji zapojením antiparalelních tyristorů a přetížitelnost je tedy nutné řešit vzhledem k použitým elektronickým prvkům. V případě absence bypassu, je potřeba chránit rozvody napájené těmito UPS před nebezpečným dotykovým napětím neživých částí proudovým chráničem. Použití běžných jističů je nedostatečné, jelikož hodnota zkratového proudu bývá velice nízká pro rychlé zapůsobení jističe. Tvar výstupní křivky napětí je díky použití IGBT tranzistorů a střídačů pracujících s šířkově pulzní modulací velmi dobrý. Výstupní sinusový tvar není ovlivněn ani dynamickými změnami zátěže a nelineární zátěží. [H]

4.3. Odrušovací síťové filtry pro odrušení UPS s frekvenčním měničem

Frekvenční měnič obsažený v UPS je silným zdrojem nf a vf rušení, šířeném jak vedením, tak vyzářováním a to do napájecí sítě a i do napájeného zařízení. Z těchto důvodů jsou dnešní UPS vybaveny vstupním a výstupním filtrem. Vstupní filtr pracuje v pásmu 150 kHz až 30 Mhz a zabezpečuje ochranu před nebezpečným rušením z napájecí sítě (přepětí). Nejčastěji se jedná o filtry EMI/EMC (odrušovací/ochranný). Výstupní filtr zajišťuje sinusový tvar napájecího napětí bez nf a vf rušivých složek.

Běžné síťové filtry, které byly podrobněji zmíněny v kapitole 2.4.5., nejsou vhodné pro odrušení UPS z následujících důvodů.

- Filtry pro obecné použití jsou navrhovány a měřeny pro impedanci systému 50/50 Ω . Z principu činnosti UPS je zřejmé, že spínáním výkonových tranzistorů se UPS jeví jako zkrat. To znamená, že vf impedance je řádově 0,1 Ω . Znamená to, že filtr EMI je připojen svým

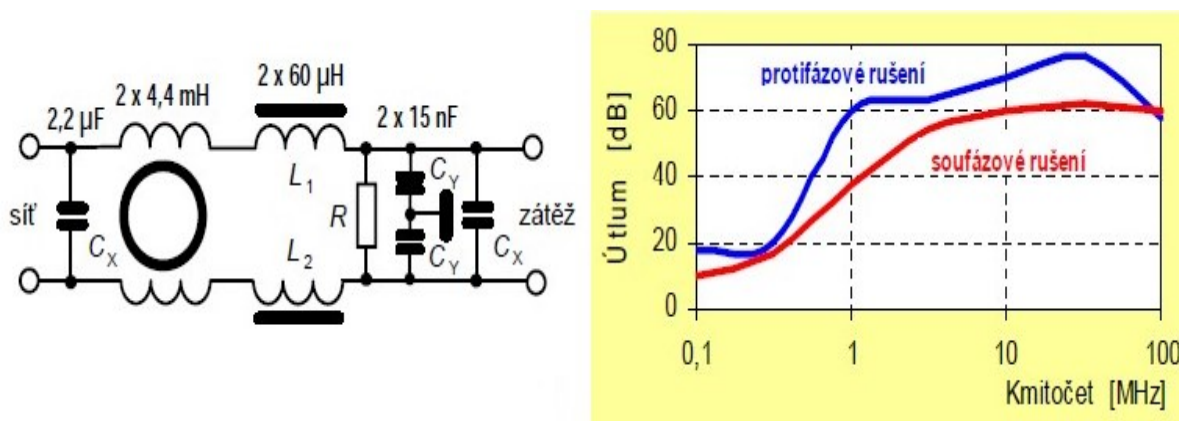
vstupem na impedanci v rozmezí 50-100 Ω a výstupem na impedanci řádově 0,1 Ω . Filtr je tedy ve skutečnosti uzavřen impedancemi 50/0,1 Ω , respektive 100/0,1 Ω místo 50/50 Ω .

- Filtry pro obecné použití jsou konstruovány pro potlačení nesymetrických složek rušení. Měníč pracující v UPS má však výraznou symetrickou složku. Z těchto důvodů musí filtr pro UPS obsahovat obvody pro potlačení symetrické a nesymetrické složky. UPS mají dále výrazné rušení v oblasti nad 3 MHz. Je vhodné tedy pro konstrukci filtrů použít průchodkové kondenzátory místo dvoupólových.

Z výše uvedených poznatků vyplývá, že filtry vhodné pro odrušení UPS s frekvenčním měničem mají kapacitní vstup a indukční výstup. Musí obsahovat obvody pro potlačení symetrické a nesymetrické složky s průchodkovými kondenzátory.

Zdroj symetrické složky rušení dělíme na dvě části, vysokoimpedanční a nízkoimpedanční. Toto je dáno konstrukcí měniče, kde na vstupu je vždy obsažen usměrňovač s vysokokapacitním kondenzátorem. Při průchodu proudu usměrňovačem, je kondenzátor připojen na střídavé napětí a celková impedance je nízká. V tomto režimu se dostávají harmonické složky spínacích kmitočtů na vstupní svorky UPS prostřednictvím parazitních vazeb. Proto musí filtr pro frekvenční měniče obsahovat obvod pro potlačení nesymetrické složky a obvod pro potlačení symetrické složky nízkoimpedanční a vysokoimpedanční.

Při vlastní konstrukci se elementy pro potlačení rušení od nízkoimpedančního zdroje umísťují směrem k zátěži a bývají to zpravidla fázové podélné indukčnosti. Paralelně zapojená kapacita na výstupu filtru se používá pro potlačení rušení od vysokoimpedančního zdroje. [E]



Obr. 33) příklad zapojení filtru pro odrušení frekvenčních měničů [G]



Obr. 34) průchodkový kondenzátor

4.4. Vliv nelineárních spotřebičů na napájecí síť TÚ - harmonické

Téměř každé elektronické zařízení zapojené do napájecí sítě představuje pro napájecí síť nelineární zátěž. Každá nelineární zátěž je zdrojem harmonických proudů. V napájecí síti telefonní ústředny, je v současné době v provozu několik výkonných UPS zdrojů, AC/DC zdrojů, klimatizací, počítačových sestav, ale i množství zářivkových svítidel či dva kusy ledniček. Lze předpokládat, že největším zdrojem harmonických proudů budou pravděpodobně UPS zdroje, protože jsou na telefonní ústředně zastoupeny ve velkém počtu. Jedná se o 3 ks UPS pro serverovou a datovou komunikaci, 3 ks pro oblast telekomunikační, rádiovou a kamerové systémy a další 4 ks určené pro zálohování osobních PC. Veškeré tyto UPS jsou dle technických listů vybaveny vstupními filtry EMC (ochranné) a filtry typu EMI (odrušovací).

Značná část elektronických systémů, které jsou instalovány v objektu telefonní ústředny, je zapojena na zmíněné UPS zdroje. Výstupy z UPS jsou odděleny prostřednictvím měničů od harmonických, tedy od nežádoucího rušení v napájecí síti. Proto není nutné řešit zpětný vliv UPS na tato zařízení, ale pouze na zařízení nevyužívající tyto záložní systémy.

Problémy, které jsou v praxi pozorovány v dané napájecí síti, se týkají především měřicích zařízení a zařízení obsahující spínané zdroje. Tyto prvky nejsou napojeny přes záložní UPS a jsou již ovlivněny rušením z napájecí sítě.

Jedná se o následující poruchové jevy:

- Blikání obrazu LCD monitorů - znemožnění sledování monitoru obsluhou.
- Přetěžování kondenzátorů napájecích zdrojů - následná nutná oprava napájecích zdrojů. V některých případech nutná oprava i základních desek příslušného zařízení.
- Rušení PC a převodníků při přehrávání softwarů a firmwarů radiostanic s následkem ukončení programovacího cyklu během přehrávání.

- Měřicí přístroje neměří správné efektivní hodnoty - dochází k následné nesprávné identifikaci poruchy či provádění výpočtu.
- Zdroje signálu negenerují správné průběhy - výstupní sinusový signál z generátoru je deformován.



Obr. 35) poškození elektrolytických kondenzátorů zdrojů PC a monitorů



Obr. 36) detail deformace pouzdra kondenzátoru

Bohužel některé poruchové jevy nelze zobrazit formou fotografie, a proto jsou zde zobrazeny alespoň poškozené kondenzátory, které byly vyjmuty z elektronických zařízení v napájecí síti TÚ. Velice časté blikání LCD monitorů, nebylo možné fotoaparátem zachytit.

5. Technická opatření pro snížení harmonických v napájecí síti TÚ Doly Bílina

5.1. Měření napájecí sítě TÚ Doly Bílina

Aby bylo možné provést opatření k omezení vzniku rušení napájecí sítě telefonní ústředny, je potřeba v prvním kroku učinit měření dané napájecí sítě. Dle výsledku tohoto měření, bude proveden rozbor výsledných hodnot s následným návrhem úprav pro snížení rušení.

Měření napájecí sítě probíhalo ve vnitřním rozvaděči telefonní ústředny. Z důvodu přehlednosti, byly harmonické proudy a napětí měřeny postupně na jednotlivých fázích. V době měření se odpojily zátěže jako např. klimatizace, ledničky, zdroj ústředny MD110, ohřívač vody a osvětlení, z důvodu získání přesnějších hodnot rušení pocházejících z instalovaných UPS. Bylo provedeno i 3-fázové měření ve venkovním pilíři PR 17.1, který je součástí budovy. Měření probíhalo při běžném provozním zatížení objektu TÚ. Při měření byla zaznamenávána i hodnota účinníku $\cos \varphi$, pro případ řešení odrušovacích filtrů s kompenzací.

Veškerá měření byla prováděna měřicím přístrojem Chauvin Arnoux, C.A 8352 Power Quality Monitor, který je majetkem SD a.s.



Obr. 37) měřicí přístroj Chauvin Arnoux, C.A 8352 Power Quality Monitor

V průběhu měření byly fáze zatíženy pouze systémy UPS a to takto:

Tab. 1) zatížení jednotlivých fází systémy UPS v objektu TÚ DB

Zatížení jednotlivých fází			
fáze	zapojené UPS		
L1	APC3000/2,7 kW	GE VH1500/1,1 kW	APC SMX750/600 W
L2	APC3000/2,7 kW	2x APC Smart 620/390 W	APC SMX750/600 W
L3	APC2200/2,0 kW	Smart 620/390 W	APC CS500/300 W

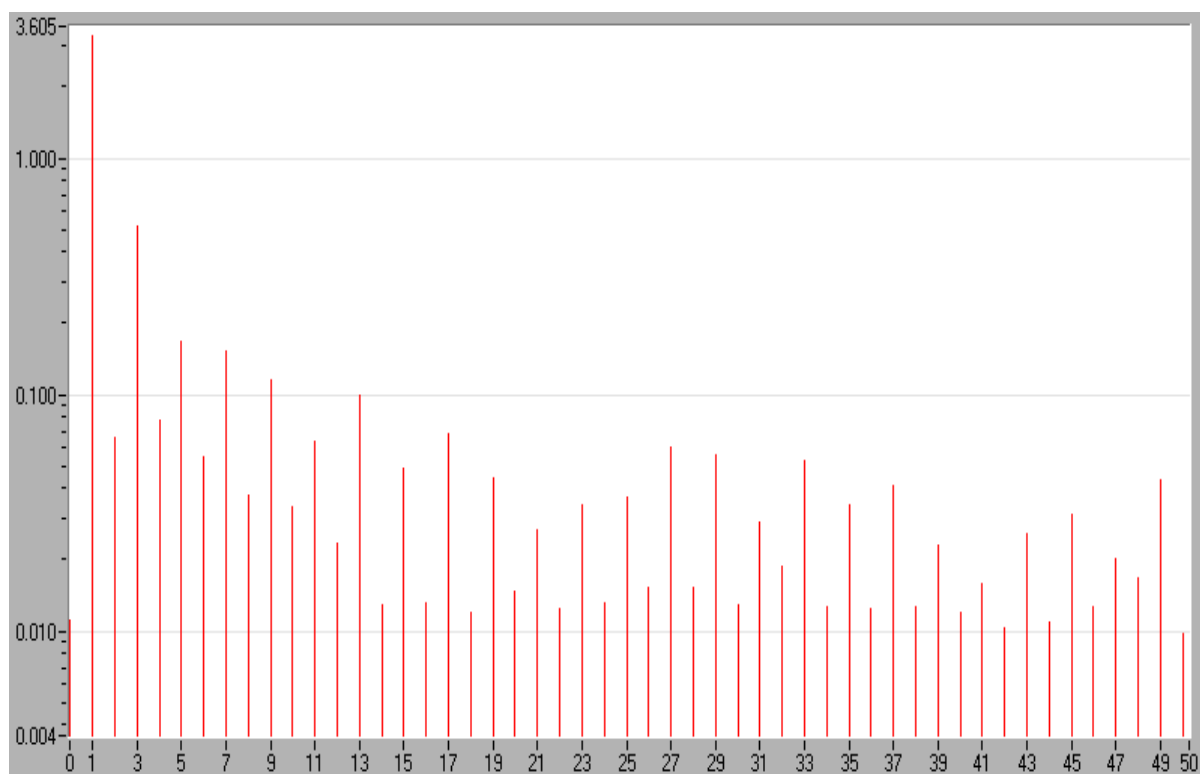
Dále byly změřeny hodnoty účinníku $\cos \varphi$ pro jednotlivé fáze při zatížení pouze systémy UPS. Byla zaznamenána i hodnota účinníku $\cos \varphi$ na UPS APC CS500. Tato UPS bude dále využita pro praktické testování na vyrobeném prototypu navrženého filtru.

Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

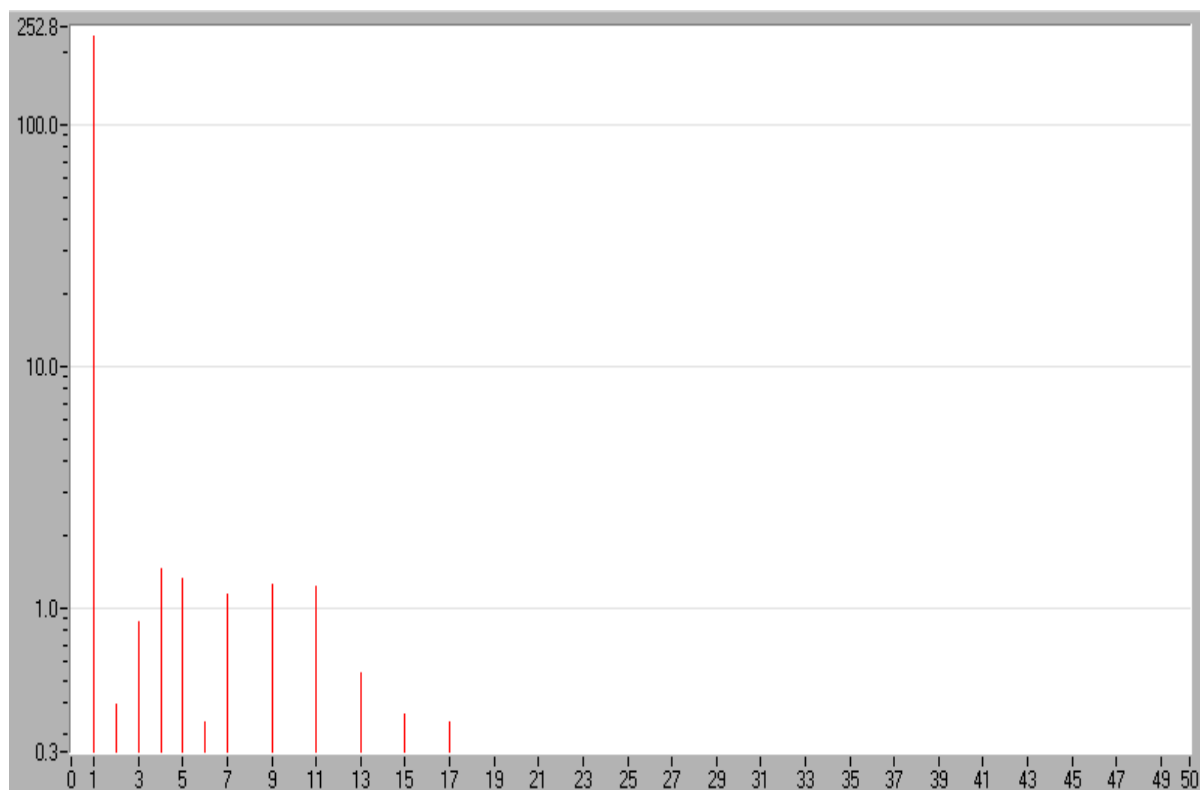
Tab. 2) změřené hodnoty $\cos \varphi$

Cos φ jednotlivých fází	
fáze / UPS	$\cos \varphi$
L1	0,81
L2	0,8
L3	0,89
UPS APC CS500	0,84

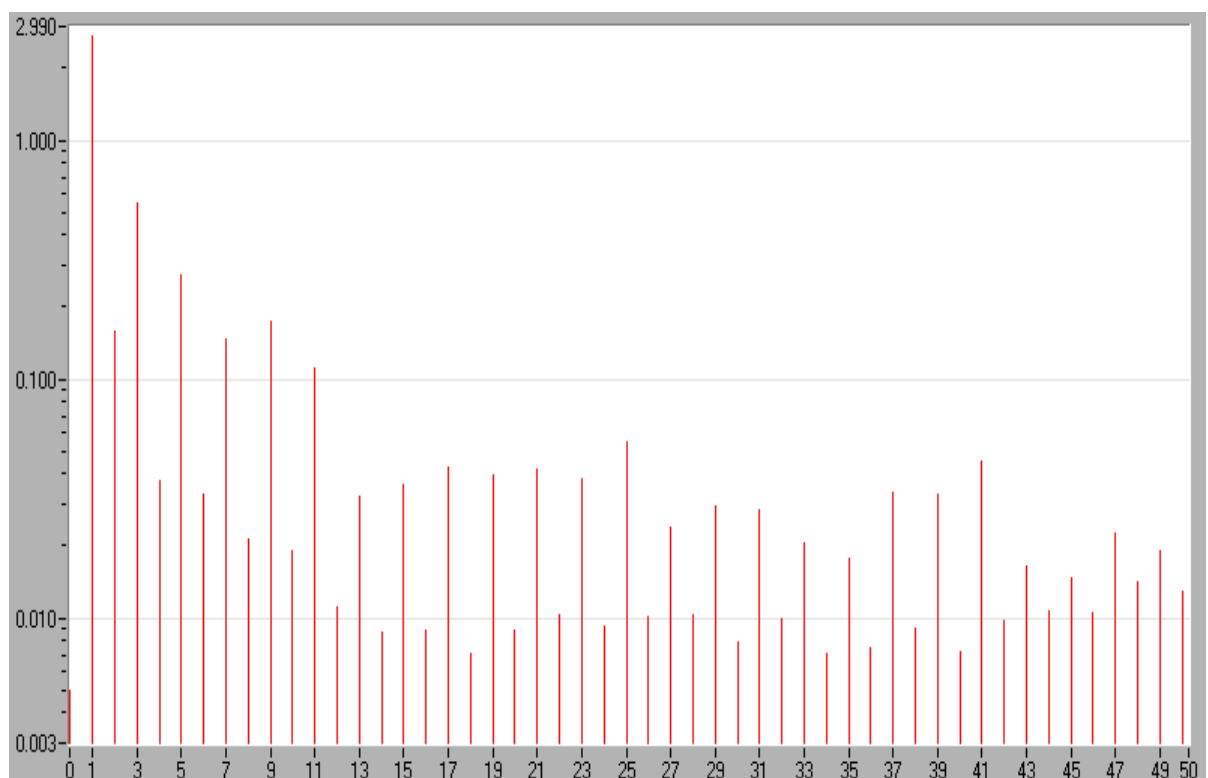
Na dalších obrázcích jsou zobrazeny výsledné naměřené spektrální analýzy harmonických proudů a napětí, vždy pro jednotlivé fáze. Na obr. 44 je zobrazena spektrální analýza 3-fázového měření zatížené napájecí sítě objektu TÚ, které bylo změřeno ve venkovním pilíři PR17.1.



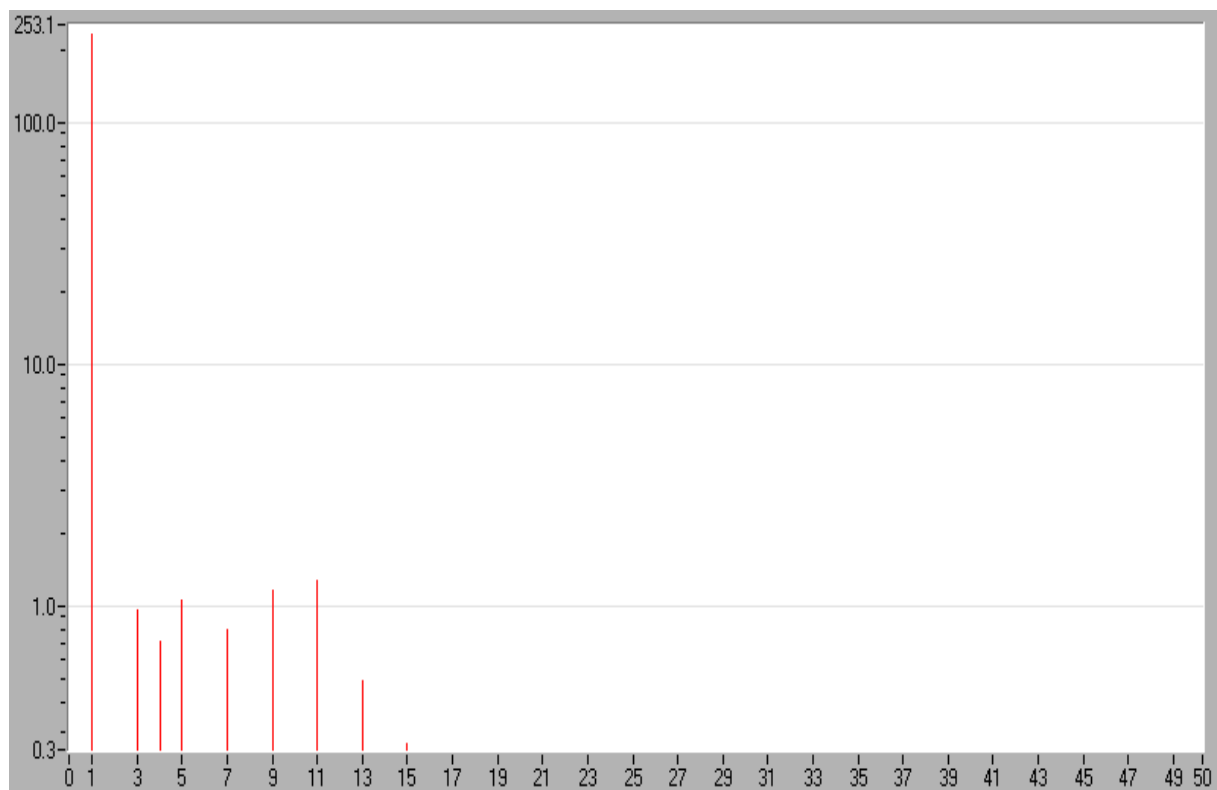
Obr. 38) spektrální analýza harmonických proudů na fázi L1



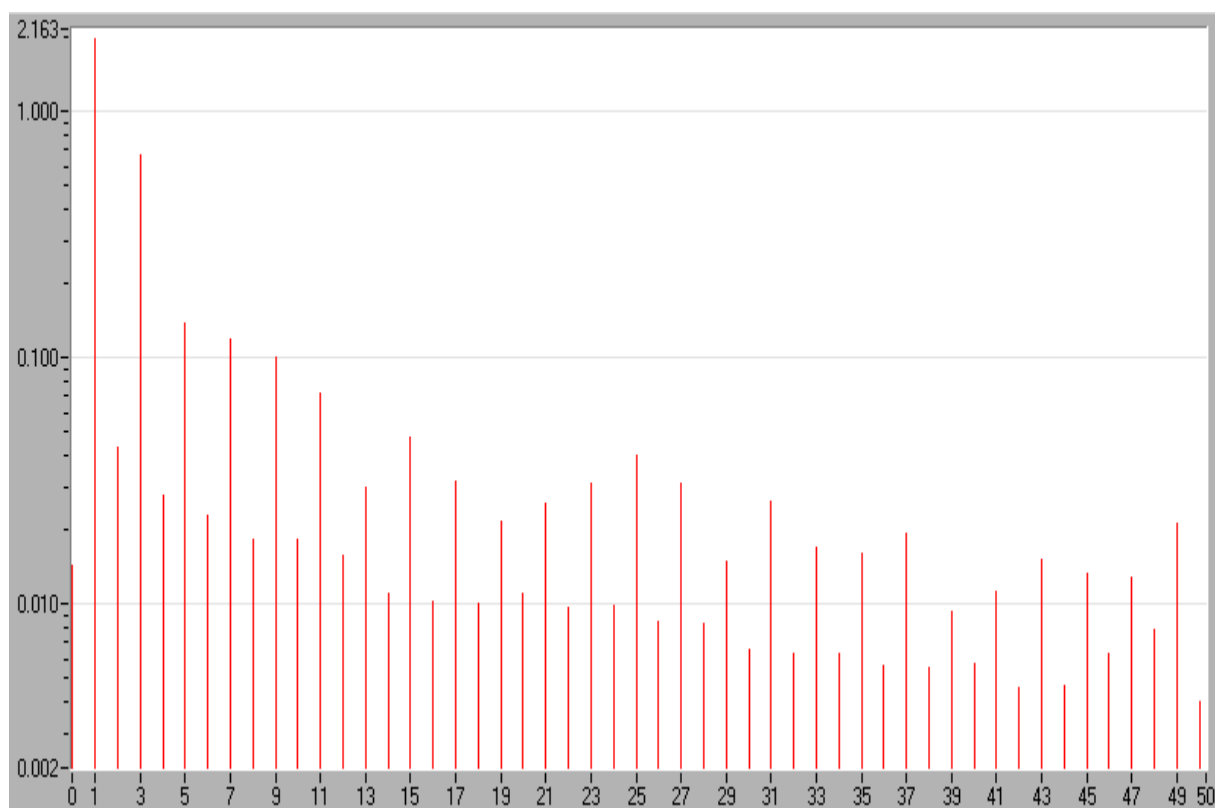
Obr. 39) spektrální analýza harmonických napětí na fázi L1



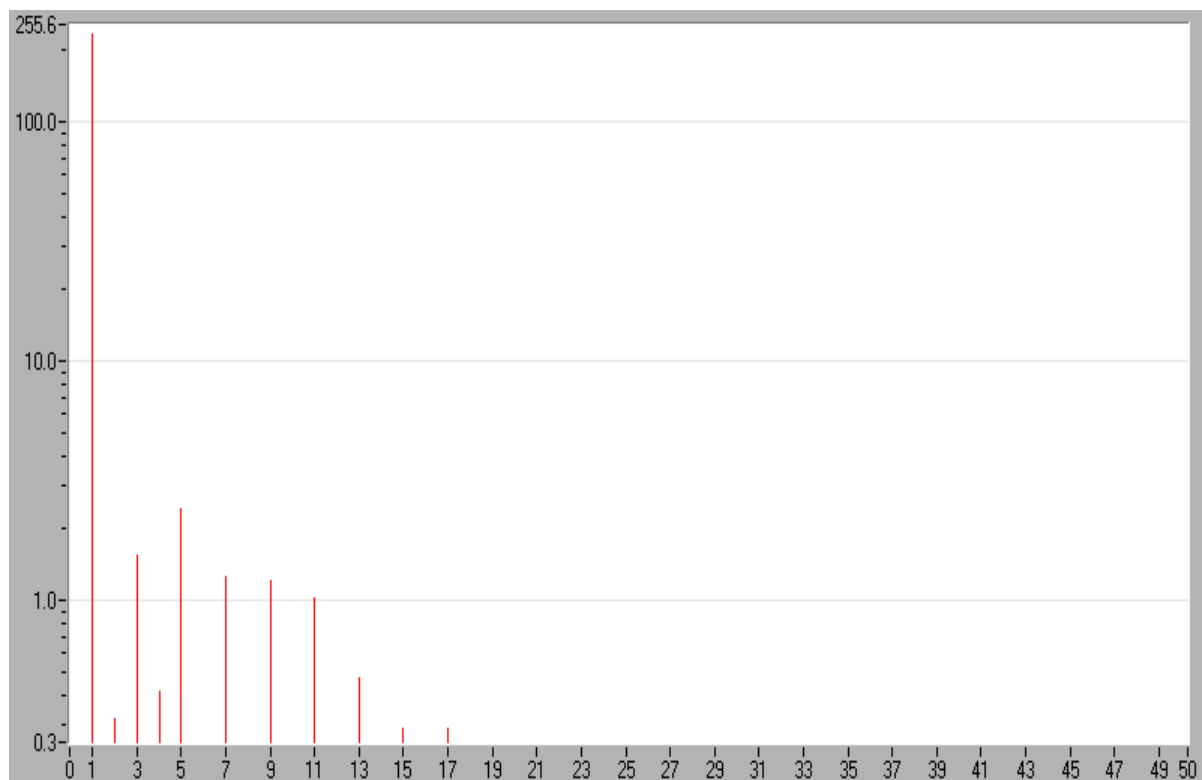
Obr. 40) spektrální analýza harmonických proudů na fázi L2



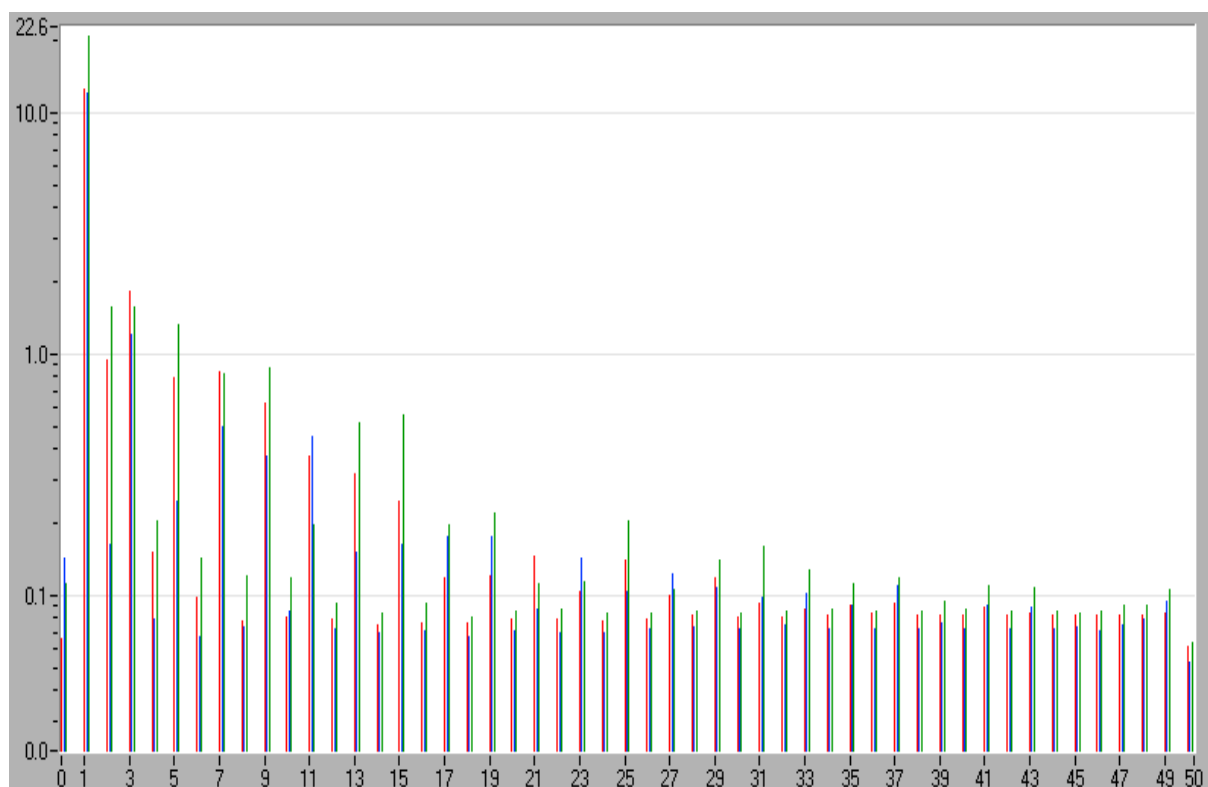
Obr. 41) spektrální analýza harmonických napětí na fázi L2



Obr. 42) spektrální analýza harmonických proudů na fázi L3

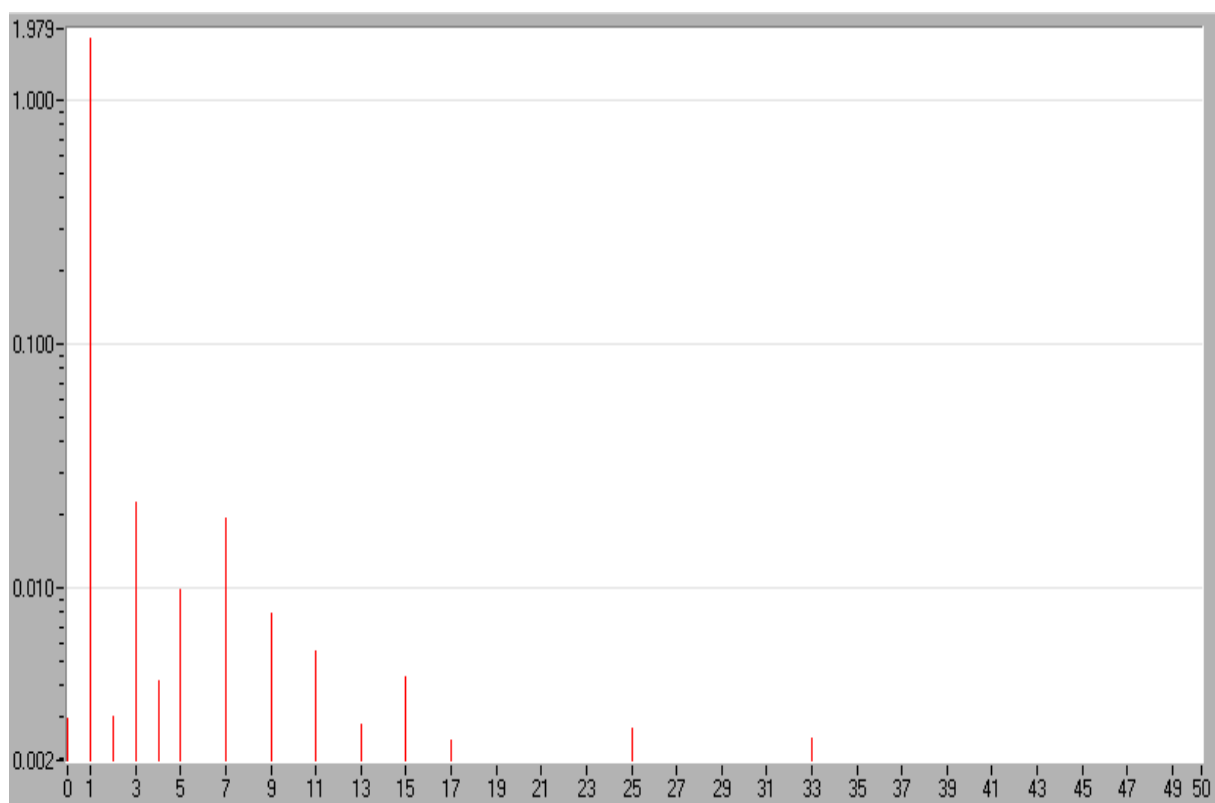


Obr. 43) spektrální analýza harmonických napětí na fázi L3

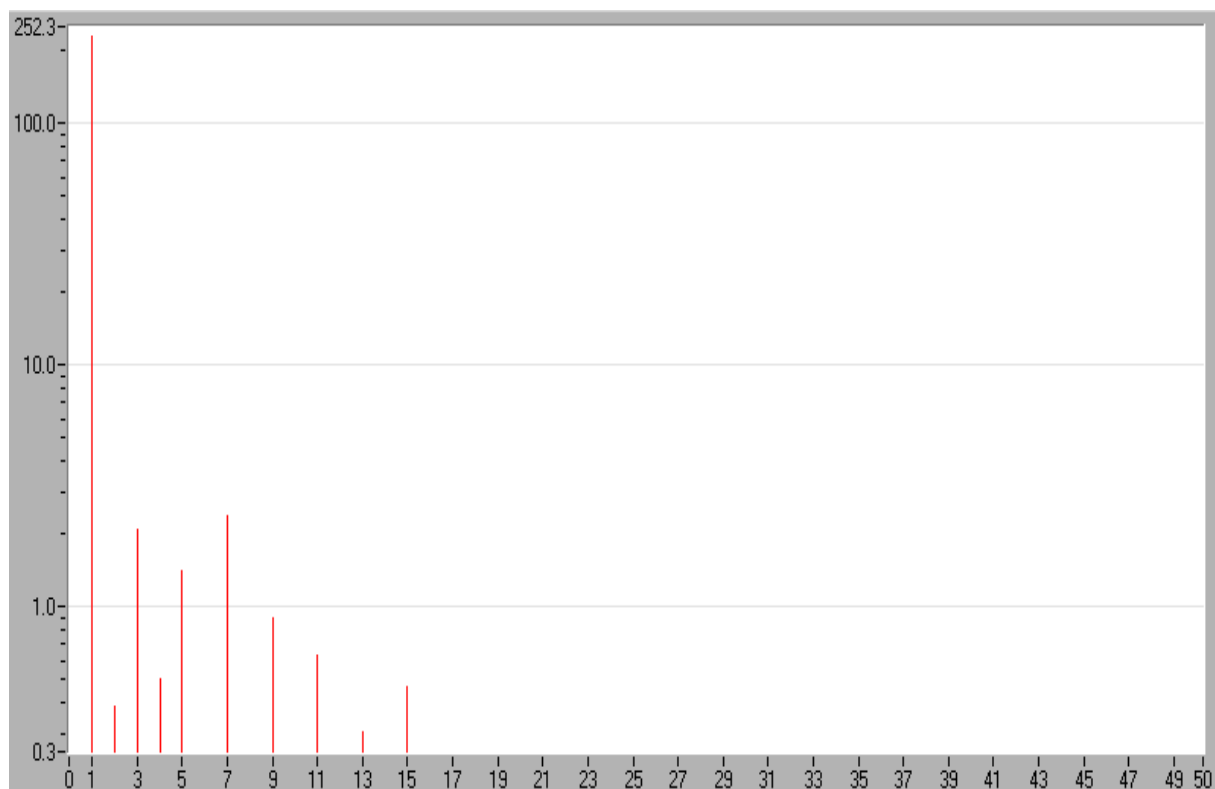


Obr. 44) spektrální analýza harmonických proudů sítě TÚ při běžném zatížení

Aby bylo možné prakticky realizovat a testovat odrušovací filtr, bylo nutné vytvořit zdroje rušení na takovém místě, kde bude následně probíhat toto testování. Jednalo se o pracoviště, kde dochází k opravám, seřizování, kalibraci a programování různých elektronických zařízení ve správě útvaru ICT. Měření bylo jednofázové a měřeny byly opět harmonické proudy a napětí do 50. harmonické. První měření bylo provedeno na lineární zátěži z důvodu ověření vlivu na napájecí síť. Pro tyto účely posloužily dvě žárovky o celkovém jmenovitém příkonu $P_N = 400 \text{ W}$. Druhé měření se uskutečnilo na nelineární zátěži. Jednalo se o měření na UPS typu APC CS500 230 V/5 A. Při tomto měření byla UPS bez zapojené zátěže. Poslední měření probíhalo na zmíněné UPS, ale již zatížené standardním PC HP 1730 a monitorem HP Compaq DC 7700.



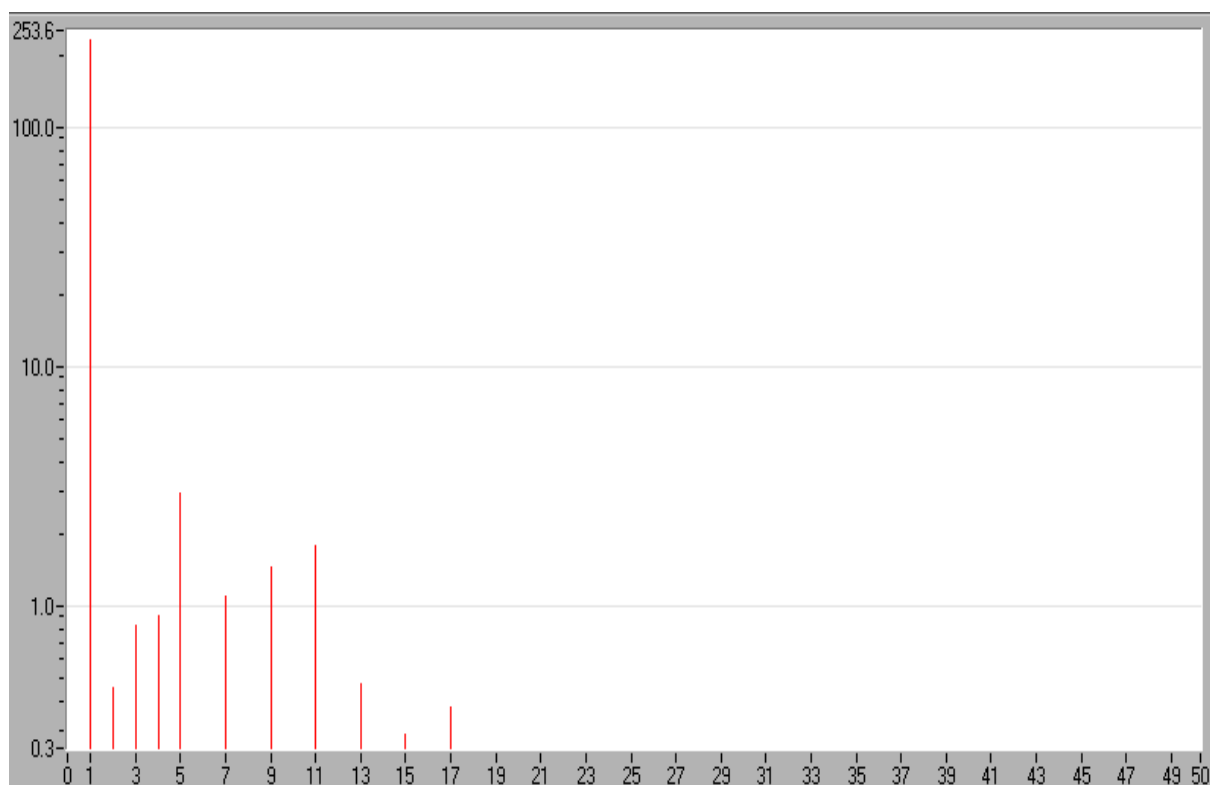
Obr. 45) spektrální analýza harmonických proudů – zátěž žárovky, $P_N = 400\text{ W}$



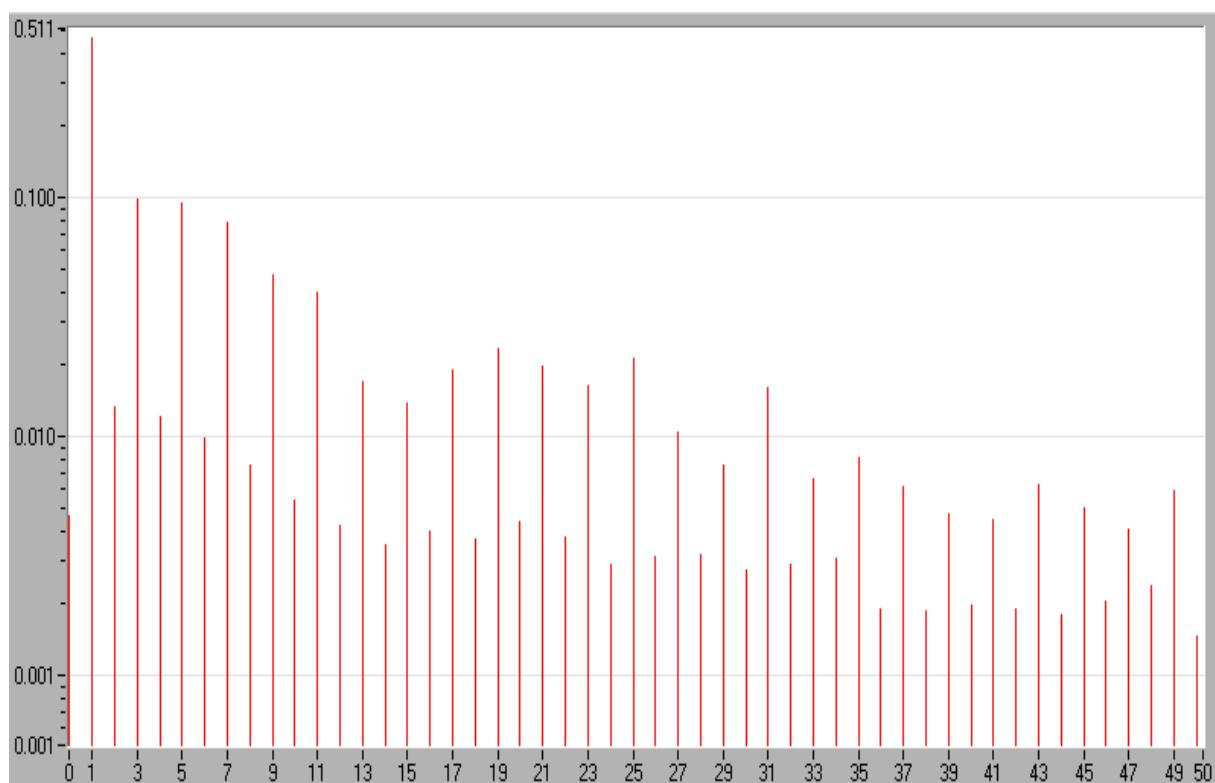
Obr. 46) spektrální analýza harmonických napětí – zátěž žárovky, $P_N = 400\text{ W}$



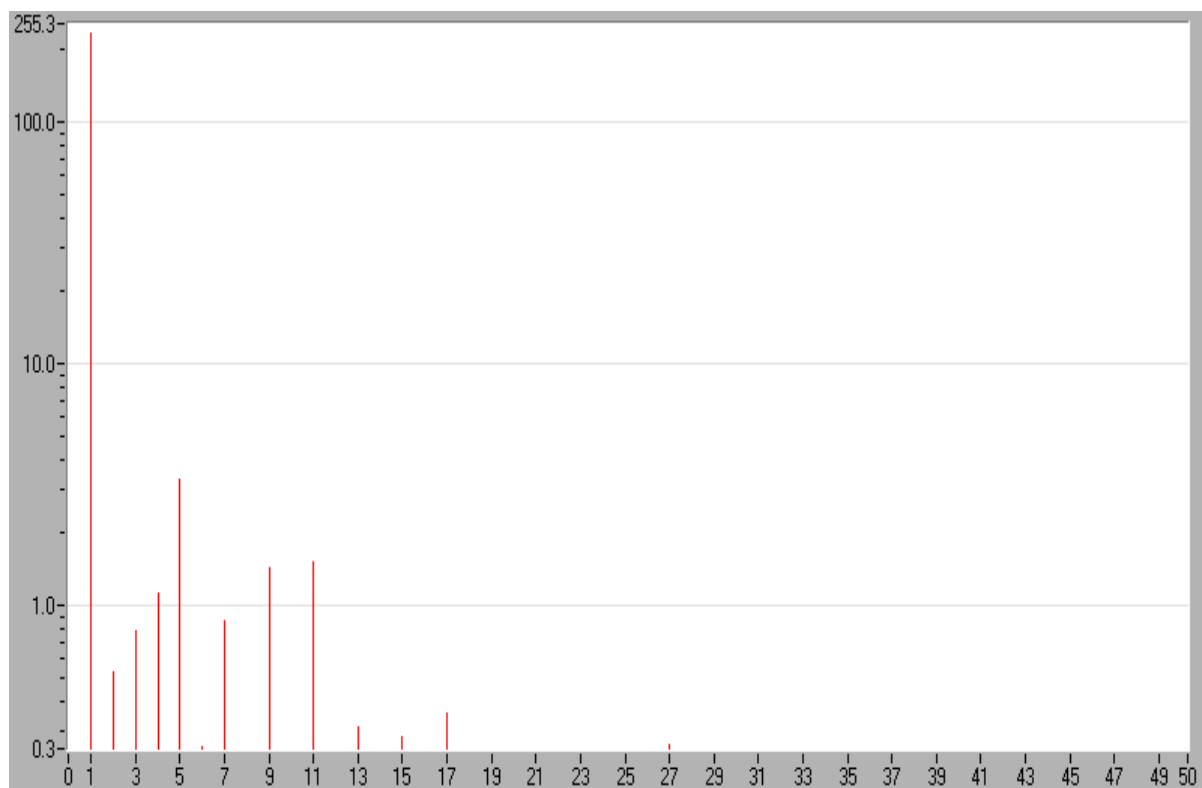
Obr. 47) spektrální analýza harmonických proudů – UPS APC CS500 bez zátěže



Obr. 48) spektrální analýza harmonických napětí – UPS APC CS500 bez zátěže



Obr. 49) spektrální analýza harmonických proudů – UPS APC CS500, zátěž PC+monitor



Obr. 50) spektrální analýza harmonických napětí – UPS APC CS500, zátěž PC+monitor

5.2. Rozbor měření

Měřením napájecí sítě TÚ byly potvrzeny předchozí měření z roku 2012, ve kterém bylo také zjištěno rušení napájecí sítě. Z aktuálních výsledků měření na jednotlivých fázích ve vnitřním rozvaděči, je patrný vliv harmonických proudů a to nejvíce ve 3., 5., 7., 9. a 11. řádu. Hodnota 3. harmonické dosahuje dokonce hodnot 0,7 A pro fázi L3, což představuje 33 % podíl harmonické proudy. Harmonické proudy 5., 7., 9. a 11. řádu se pohybují u jednotlivých fází v mezích 3 – 10 % vzhledem k základní harmonické.

Rozborem výsledků měření harmonických napětí byl zjištěn převážně výskyt harmonických 3., 5., 7., 9. a 11. řádu, ale i harmonických 2. a 4. řádu. Průměrně se hodnoty pohybovali mezi 1 až 1,5 V vzhledem k základní harmonické. Pouze u měření na fázi L3 byla hodnota 5. řádu 2,5 V, což představuje 1,1 % základní harmonické. S porovnáním výsledků měření harmonických proudů, byly očekávány vyšší hodnoty harmonických napětí.

Porovnáním hodnot 3-fázového měření harmonických proudů celé sítě TÚ (při běžném zatížení), je patrný vyšší celkový odběr proudů. Toto je dáno zapojením elektronických zařízení a spotřebičů, které jsou běžně využívány pro chod TÚ. Jedná se především o osvětlení, klimatizace, zdroj ústředny MD110, ohřívač vody, lednice, atd. Při přepočtu nejvyšší harmonické tohoto měření, což je 3. harmonická pro všechny tři fáze, jsou tyto hodnoty 7 %, 10 % a 9 % vzhledem k základní harmonické. Jestliže porovnáme jednotlivé fáze zatížené pouze UPS záložními systémy, má např. zmíněná 3. harmonická hodnoty pro tyto fáze 17 %, 21 % a 33 % vzhledem k základní harmonické. Tímto je patrný vliv těchto UPS na výsledky měření harmonických napájecí sítě. Vlastní vliv rušení těchto UPS na jiná zařízení je samozřejmě závislý na umístění rušeného zařízení v síti. Samozřejmě, že i ostatní zařízení umístěné na TÚ, především zářivkové osvětlení a klimatizace, se podstatnou měrou podílí na rušení napájecí sítě.

Na dalším měření bylo možné porovnat vliv lineární a nelineární zátěže na napájecí síť. Výrazný výskyt hodnot harmonických řádů proudů u nelineární zátěže, je patrný až do měřitelného spektra 50. harmonické, oproti lineární zátěži. Harmonické proudy lineární zátěže se vyskytují sporadicky a s malým podílem vzhledem k základní harmonické. Tímto bylo ověřeno, jaký vliv mají současné elektrospotřebiče na napájecí síť, vzhledem k např. dříve používanému žárovkovému osvětlení či klasickým zdrojům elektrických přístrojů.

Na změřených hodnotách UPS CS500 je patrný nárůst harmonických proudů při zatížení UPS. Nejvýznamnější 3. a 5. harmonická dosahuje hodnot bez zatížení 15 % vzhledem k základní harmonické a při zatížení 20 %. Jelikož byla UPS zatížena pouze na 30 % jmenovitého výkonu, lze předpokládat další navýšení hodnot harmonických proudů při plné zátěži. Porovnáním

harmonických napětí nebyl zaznamenán výrazný rozdíl mezi hodnotami při nezatížené a zatížené UPS. Naopak lze pozorovat spíše mírný pokles hodnot a to především u 7. a 11. harmonické.

Vzhledem k tomu, že je v elektrické síti telefonní ústředny skutečně zaznamenáváno rušení, které ovlivňuje chod některých zařízení (viz. kapitola 4.4) a dle uskutečněných měření je napájecí síť opravdu rušena, bude proveden návrh úpravy napájecí sítě s následnou výrobou prototypu odrušovacího filtru. Dle výsledků měření napájecí sítě TÚ a měření na UPS lze usoudit, že výskyt vyšších hodnot harmonických, může být způsoben zapojením velkého počtu UPS do společného napájecího uzlu.

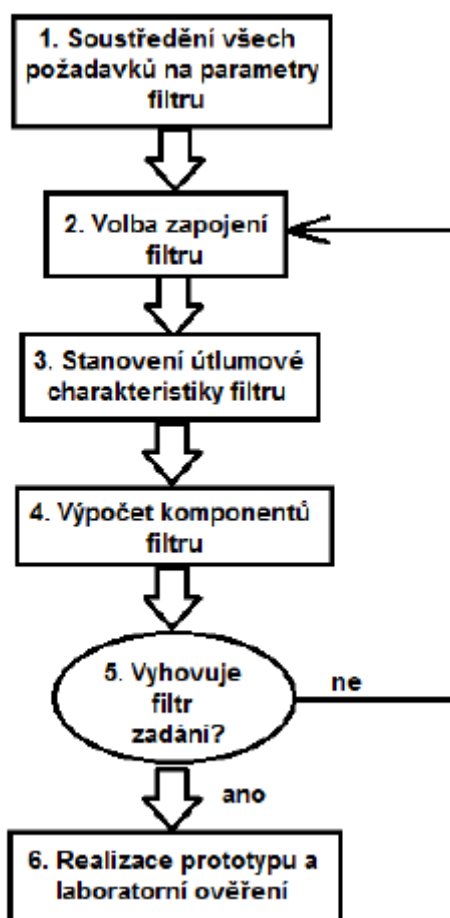
5.3. Návrh a výpočet filtru harmonických

Jelikož nelze z důvodů provozních a technických provádět testování navrženého filtru na hlavních UPS během provozu, bylo z těchto důvodů prováděno výše uvedené měření na UPS CS500. U této UPS byl zaznamenán také výskyt harmonického rušení a vzhledem k tomu, že je možno tuto UPS využít jako zkušební, bude zde testován i navržený filtr.

V návrhu budou řešeny dva typy odrušovacích filtrů. Úkolem bude vytvořit filtr pro liché harmonické od řádu 3 po řád 11, které dosahovaly dle měření nejvyšších hodnot. V prvním případě se bude jednat o odrušovací LC filtr, který je však využíván pro odrušení harmonických od 20. řádu a jde spíše o vf filtr. Jednoduchým výpočtem bude prokázán důvod nerealizovatelnosti pro odrušení nízkých řádů harmonických.

Druhý návrh bude řešit již realizovatelný a v praxi pro nízké řády používaný pasivní filtračně kompenzační filtr. Jak již z názvu napovídá, filtr plní i funkci kompenzační. Jelikož během měření na UPS CS500 byla zaznamenávána i hodnota účinníku $\cos \varphi$, lze po realizaci filtru zjistit nejen jeho filtrační funkci, ale také funkci kompenzační.

Při návrhu odrušovacích filtrů by měl být dodržen postup dle vývojového diagramu návrhu filtrů.



Obr. 51) vývojový diagram návrhu filtru [CH]

Do bloku č. 1 patří především napájecí napětí, zatěžovací proud, útlumové charakteristiky, velikosti impedancí zdroje a zátěže. Dále sem zařazujeme i rozměry, hmotnost a cenu, které také ovlivňují návrh filtru. Blok č. 2 představuje volbu zapojení filtru, která je ovlivněna mezí pásma propustnosti, pásmem potlačení, impedančními poměry napájení – filtr – zátěž a opět rozměry, hmotností a cenou. Blok č. 3 řeší volbu žádané útlumové charakteristiky, která je závislá především na typu zvoleného filtru. Pro různé typy filtrů (EMI, EMC, EMS) jsou požadavky vždy rozdílné. V bloku č. 4 je již realizován vlastní výpočet parametrů komponentů filtru. Výpočet může být realizován dle známých impedancí, požadovaných útlumů a odhadu velikosti jednoho prvku L či C filtru. V posledních dvou etapách, tj. blok č. 5 a č. 6, již upřesňujeme parametry komponentů v souladu s technickými požadavky a normami, analyzujeme kmitočtové charakteristiky a porovnáváme teoretické výpočty s praktickými hodnotami. [E]

Praktický návrh filtru dle vývojového diagramu

Odrušovací LC filtr

Dle praktického měření napájecí sítě telefonní ústředny se ukázalo, že je tato síť rušena vysokými hodnotami harmonických vyšších řádů. Tyto proudy a napětí mají z velké pravděpodobnosti vliv na rušení některých zařízení připojených do této sítě. Aby bylo dosaženo odstranění i nejnižších harmonických v této síti, tj. od 3. harmonické, bude řešen návrh pasivního filtru s mezním kmitočtem 100 Hz. Tento filtr bude řešen pro pracoviště, kde probíhají opravy elektronických zařízení, které jsou v současné době ovlivněny rušením napájecí sítě v průběhu jejich nastavování a testování. Hodnota zátěžného proudu je zvolena dle praktických měření s volbou potřebné rezervy. Hodnota úbytku napětí $\approx 1\%$ byla změřena v dané napájecí síti při lineární zátěži 400 W (2x žárovka 200 W).

Je jasné, že tento návrh bude v praxi těžko realizovatelný, jelikož na těchto nízkých kmitočtech bude docházet k přesycení tlumivek a dojde ke zkreslení síťového kmitočtu. Dále bude jistě tento návrh narážet na praktické provedení filtru z důvodu vypočtených vysokých hodnot prvků L a C. I přesto, že jsou známy tyto možné nedostatky, bude početně ověřena tato teorie a navrženo další řešení k odstranění harmonických vyšších řádů.

• 1. Soustředění všech požadavků na parametry filtru

jmenovité napájecí napětí U_N :	230 V
jmenovitá frekvence f_N :	50 Hz
zátěžný proud I_Z :	2 A
úbytek napětí při zátěži U_Z :	1 %
mezní kmitočet f_m :	100 Hz
vložený útlum A_u :	30 dB

impedance sítě Z_S :

$$Z_S = U_Z \cdot \frac{U_N}{I_Z} = 0,01 \cdot \frac{230}{2} = \underline{\underline{1,15 \Omega}}$$

Impedance sítě je závislá na konfiguraci sítě a na charakteru spotřebičů, které napájí. Dále je časově a kmitočtově proměnná. Stanovení její hodnoty je zejména pro vf oblast velice náročné. Získat vhodné hodnoty této impedance je nejlépe měřením, což vyžaduje vhodné přístrojové vybavení, čas a finanční prostředky. [E]

Z analýzy praktických výsledků vyplývá, že pro oblast nízkých kmitočtů, tj. od 0 do několika kHz, jsou hodnoty symetrické a nesymetrické složky impedance rovny ss odporu sítě, nebo hodnotě

její impedance nakrátko, což bývá nejčastěji $< \Omega$. Dle předchozího výpočtu je impedance sítě řešeného pracoviště 1,15 Ω .

$$\text{impedance zátěže } Z_Z: \quad Z_Z = \frac{U_N - (U_Z \cdot U_N)}{I_Z} = \frac{230 - (0,01 \cdot 230)}{2} = \underline{\underline{113,85}} \quad \Omega$$

Charakter a impedance zátěže závisí na prvním vstupním obvodu směrem k síti. Je-li na vstupu např. transformátor, bude symetrická složka na nižších kmitočtech odpovídat poměru vstupního napětí ke vstupnímu proudu. Se stoupajícím kmitočtem roste symetrická složka lineárně a hodnota odpovídá vstupní indukanci X_L transformátoru. Nesymetrická složka vstupní impedance bývá vysoká na nízkých kmitočtech a klesá se stoupajícím kmitočtem. [E]

Impedance zátěže určuje maximální hodnoty prvků L a C filtru, při kterých nedochází k ovlivnění napájecí sítě a zátěže. Doporučuje se, aby celková hodnota sériové induktivní reaktance X_L lineárních tlumivek nepřekročila na pracovním kmitočtu 1 % impedance zátěže. Taktéž paralelní kapacitní reaktance X_C všech kondenzátorů je omezena hodnotou 100krát větší nežli impedance zátěže.

Vypočtená hodnota impedance zátěže, je vypočtena vzhledem k lineární zátěži (odporový bočník). Skutečná zátěž bude mít spíše induktivní charakter a v případě zapojení zařízení se spínaným zdrojem bude mít v důsledku spínání výkonových tranzistorů tendenci klesavou. Jak již však bylo uvedeno, charakter a impedance zátěže je hodnota proměnná a nutno vypočtené hodnoty brát s jistou rezervou. Každý vyrobený pasivní či aktivní filtr je vždy potřeba testovat na příslušné napájecí síti a zátěži.

stanovení podmínek induktivní reaktance X_L : $X_L = \omega L \leq 0,01 \cdot Z_Z$

$$1\% \rightarrow X_L = \frac{Z_Z}{100} = \frac{113,85}{100} = 1,1385 \quad \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{1,1385}{314,16} = 3,62 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{3,62}} \text{ mH}$$

maximální hodnota indukčností zapojených v sérii nesmí přesáhnout hodnotu 3,62 mH.

stanovení podmínek kapacitní reaktance X_C : $X_C = \frac{1}{\omega C} \leq 0,01 \cdot Z_Z$

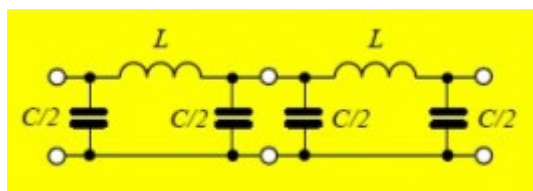
$$1\% \rightarrow X_C = 100 \cdot Z_Z = 100 \cdot 113,85 = 11385 \quad \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = \frac{1}{314,16 \cdot 11385} = 2,79 \cdot 10^{-7} = \underline{\underline{0,28}} \quad \mu\text{F}$$

maximální hodnota kapacit zapojených paralelně nesmí překročit hodnotu 0,28 μF .

- **2. a 3. Volba zapojení filtru a stanovení útlumové charakteristiky filtru**

Z důvodu požadavku na vložný útlum $A_u = 30$ dB a z ekonomických důvodů, je zvolen dvojčlankový filtr složený ze dvou kaskádně spojených základních článků Π , jelikož obsahuje pouze dvě tlumivky.



Obr. 52) dvojitý článek Π

- **4. Výpočet komponentů filtru**

výpočet hodnot kondenzátorů C:

$$C = \frac{1}{\pi \cdot f_m \cdot R} = \frac{1}{\pi \cdot 100 \cdot 113,85} = \frac{1}{35767} = 2,8 \cdot 10^{-5} = \underline{\underline{28}} \mu\text{F}$$

Vypočtená hodnota se vztahuje k jednomu prvku a pro dvojitý článek typu Π bude výsledná kapacita $56 \mu\text{F}$.

výpočet hodnot tlumivek L:

$$L = \frac{R}{\pi \cdot f_m} = \frac{113,85}{\pi \cdot 100} = \frac{113,85}{314,16} = 0,362 = \underline{\underline{362}} \text{ mH}$$

Vypočtená hodnota se vztahuje k jednomu prvku a pro dvojitý článek typu Π bude výsledná indukčnost 724 mH.

- **5. Vyhovuje filtr zadání?**

Při porovnání podmínek na stanovení maximálních hodnot kapacity a indukčnosti, vzhledem k požadovaným parametrům filtru, jsou vypočtené hodnoty tohoto typu filtru zcela nevyhovující. Je zřejmé, že mezní kmitočet $f_m = 100$ Hz není možno nastavit na tomto typu filtru bez nežádoucích vlivů. Při rychlém přepočtu lze zjistit, že dodržení podmínek hodnot kapacit a indukčností zajistíme až od mezního kmitočtu $f_m = 1$ kHz a podmínky volby pouze výchozího půlčlánku typu L. Využití těchto filtrů je tedy vhodné pro odstraňování harmonických vyšších řádů pro vysokofrekvenční oblast. Filtr tedy nevyhovuje pro požadované účely.

Pasivní filtračně kompenzační filtr

Jako druhá varianta pro omezení harmonického rušení bude řešena formou pasivního filtračně kompenzačního filtru. Tyto filtry jsou využívány v napájecí síti jednak pro kompenzaci účinníku a také pro filtraci harmonických vyšších řádů. Jedná se o složení rezonančních LC obvodů laděných vždy pro příslušnou harmonickou frekvenci. Kompenzace induktivního jalového proudu je prováděna vložením tlumivky s fázově řízeným tyristorovým spínačem v antiparalelním zapojení, čímž dochází k možnosti řízení induktivních proudů. Kompenzace kapacitních proudů je prováděna kondenzátory zapojenými vždy pro příslušnou harmonickou, protože pro základní harmonickou mají kapacitní charakter a jsou tedy prostředkem pro kompenzaci účinníku.

Jelikož problémem v napájecí síti je rušení, bude návrh řešen především jako filtr harmonických vyšších řádů a bude upuštěno od fázově řízené tlumivky. Postup návrhu bude proveden opět dle vývojového diagramu pro návrh filtru. Hodnoty požadovaného filtru budou vypočteny dle výsledků měření uskutečněného na zatížené UPS APC CS500.

- **1. Soustředění všech požadavků na parametry filtru**

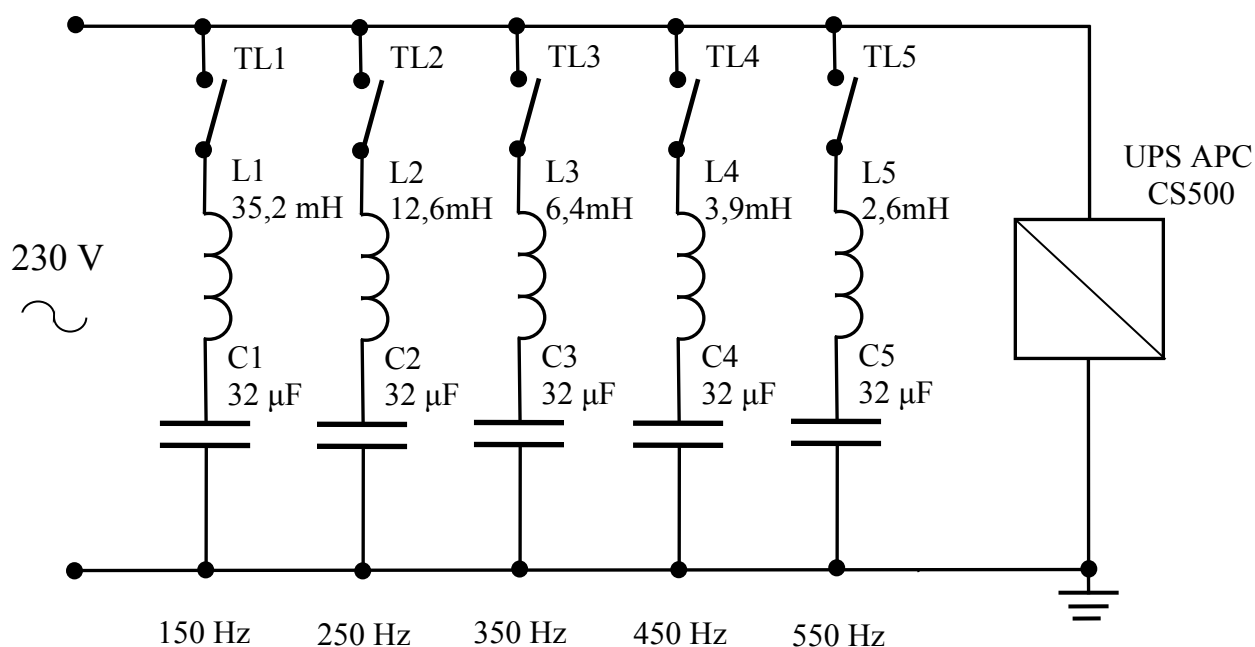
jmenovité napájecí napětí U_N :	230 V
jmenovitá frekvence f_N :	50 Hz
zátěžný proud I_Z :	0,5 A
$\cos \varphi$ změřený na zátěži:	0,84
jmenovité napětí kondenzátoru U_{NC} :	250 V
jmenovitá kapacita kondenzátoru C:	32 μF
jmenovitý výkon kondenzátoru Q_{NC} :	400 var

- **2. a 3. Volba zapojení filtru a stanovení útlumové charakteristiky filtru**

Základním obvodem navrhovaného filtru bude sériový rezonanční LC obvod. Pro výpočty bude zanedbán parametr R. V praktických návrzích se obvykle volí hodnoty kondenzátorů ze jmenovité řady a dopočítávají se velikosti tlumivek, které se následně vyrábějí. Pokud bychom chtěli docílit co nejmenších hodnot tlumivek (ekonomické důvody), je potřeba navrhnout vyšší hodnoty kapacit. Tyto vyšší hodnoty kapacit ovšem naráží také na některé problémy. Jak již bylo zmiňováno, kondenzátor se chová při základní harmonické v obvodu jako kompenzátor a musí být tedy i takto dimenzován. Pokud budeme volit pro navrhované filtry kondenzátory v řádech desítek μF s požadavkem kompenzace vysokých harmonických proudů při vysokém jmenovitém napětí, budou ekonomické náklady na pořízení potřebných kondenzátorů vysoké. Při volbě kondenzátorů

je nutné tedy sledovat udávané provozní podmínky a kvalitu dielektrika, která má velký vliv na vnitřní odpor kondenzátoru. Dalším problémem u vysokých hodnot kapacit kondenzátorů je jejich reaktance, která se vzrůstající hodnotou kapacity klesá. Tím dochází k následnému průtoku velkých hodnot proudu kondenzátorem.

Filtr bude navržen pro 3., 5., 7., 9. a 11. řád harmonické. Tyto řády jsou určeny dle měření na zatížené UPS APC CS500, s požadavkem na snížení jejich hodnot harmonických proudů a napětí. Pro tyto řády se zvolí jmenovité hodnoty kompenzačních kondenzátorů 32 μF /250 V a tlumivky se dopočítají.



Obr. 53) schéma zapojení navrženého pasivního filtračně kompenzačního filtru

• 4. Výpočet komponentů filtru

Základním vztahem pro výpočet rezonančních obvodů je Thomsonův vzorec a vychází z předpokladu, že reaktance kapacitní a induktivní se při rezonanci rovnají:

$$X_L = X_C \rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega \cdot C} \rightarrow \omega^2 = \frac{1}{L \cdot C} \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \rightarrow 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}}$$

Výpočet kondenzátorů

Pro realizaci filtru bude uvažováno použití kompenzačních kondenzátorů 32 $\mu\text{F}/250 \text{ V}$. Z důvodu malého odběru zátěže a tím pádem nižších hodnot harmonických proudů protékajících kondenzátory, je možné navrhnout vyšší hodnoty kapacit s cílem snížit hodnoty výsledných tlumivek.

Připojíme-li LC filtr s rezonanční frekvencí pro n -tou harmonickou na konstantní napětí základní harmonické, pak při rezonanci platí:

$$nX_1 = \frac{X_{C1}}{n} \rightarrow X_{L1} = \frac{X_{C1}}{n^2}$$

$$U_1 = U_{C1} - U_{L1} = (X_{C1} - X_{L1}) \cdot I = \left(X_{C1} - \frac{X_{C1}}{n^2} \right) \cdot I = \frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot X_{C1} \cdot I = \frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot U_{C1} [\text{K}]$$

Na kondenzátoru se tedy objeví pro základní harmonickou napětí:

$$U_{C1} = \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot U_1$$

Pro jednotlivé harmonické pak tedy:

n	3	5	7	9	11
$\frac{n^2}{n^2 - 1}$	1,125	1,042	1,021	1,0125	1,008

Při přepočtu výsledného koeficientu, který je nejvyšší pro 3. harmonickou, je hodnota zvýšeného napětí na kondenzátoru:

$$U_{C3} = 1,125 \cdot 230 = \underline{\underline{258,8}} \text{ V}$$

Jelikož jsou řešené kompenzační kondenzátory vyráběny pro zvýšení napětí na kondenzátoru o 10 % (dle norem), tj. při jmenovitém napětí kondenzátoru $U = 250 \text{ V}$, lze běžně provozovat tyto kondenzátory i při napětí $U = 275 \text{ V}$, jsou zvolené jmenovité hodnoty napětí kondenzátorů v toleranci.

Proud, který musí kondenzátor trvale vydržet:

$$I_C = 1,3 \cdot \frac{Q_{NC}}{U_{NC}}$$

Pro zvolené kondenzátory tedy:

$$I_C = 1,3 \cdot \frac{400}{250} = \underline{\underline{2,08}} \text{ A}$$

Dle norem musí kondenzátory trvale snést zvýšení proudu o 30 %, tj. 2,7 A.

Protéká-li kondenzátorem proud základní harmonické I_1 a proud harmonické I_n je kondenzátor zatěžován větším proudem a pro výsledný filtr pak platí:

$$Q = \frac{I_1^2}{\omega_1 \cdot C} + \frac{I_n^2}{n \cdot \omega \cdot C} \quad [\text{K}]$$

Hodnoty proudů pro výpočet celkového výkonu filtru vychází z reaktance kondenzátorů. Reaktance použitého kondenzátoru 32 μF :

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot (32 \cdot 10^{-6})} = \underline{\underline{99,47 \quad \Omega}}$$

pak proud kondenzátorem:

$$I_{CI} = \frac{U_N}{X_C} = \frac{230}{99,47} = \underline{\underline{2,31 \quad \text{A}}}$$

pro veškeré sekce filtru je celkový proud kondenzátory:

$$I_{CF} = n \cdot I_{CI} = 5 \cdot 2,31 = \underline{\underline{11,55 \quad \text{A}}}$$

pro navrhovaný filtr tedy kompenzační výkon:

$$\begin{aligned} Q_F &= \frac{I_1^2}{\omega_1 \cdot C} + \frac{I_3^2}{n_3 \cdot \omega_1 \cdot C} + \frac{I_5^2}{n_5 \cdot \omega_1 \cdot C} + \frac{I_7^2}{n_7 \cdot \omega_1 \cdot C} + \frac{I_9^2}{n_9 \cdot \omega_1 \cdot C} + \frac{I_{11}^2}{n_{11} \cdot \omega_1 \cdot C} = \\ &= \frac{(2,31)^2}{0,01} + \frac{(2,31)^2}{0,03} + \frac{(2,31)^2}{0,05} + \frac{(2,31)^2}{0,07} + \frac{(2,31)^2}{0,09} + \frac{(2,31)^2}{0,11} = \\ &= 533,6 + 177,9 + 106,7 + 76,2 + 59,3 + 48,5 = \underline{\underline{1002 \quad \text{var}}} \end{aligned}$$

Pokud navrhovaný filtr budeme řešit i jako kompenzační, pak pro dosažení potřebné hodnoty $\cos \varphi = 0,95$ je potřebný kompenzační výkon:

$$Q_C = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_{\text{komp}})$$

kde činný výkon zatížené UPS CS500:

$$P = U_N \cdot I_Z \cdot \cos \varphi = 230 \cdot 0,5 \cdot 0,84 = 96,6 \quad \text{W}$$

jelikož je nutné započítat i proud kondenzátory všech pěti sekcí, potom je výsledný výkon filtru:

$$P = U_N \cdot (I_Z + I_{CF}) \cdot \cos \varphi = 230 \cdot (0,5 + 11,55) \cdot 0,84 = \underline{\underline{2328 \quad \text{W}}}$$

a $\operatorname{tg} \varphi$:

$$\cos \varphi = 0,84 \rightarrow \varphi = 32,86 \rightarrow \operatorname{tg} \varphi = 0,65$$

$$\cos \varphi_{\text{komp}} = 0,95 \rightarrow \varphi_{\text{komp}} = 18,19 \rightarrow \operatorname{tg} \varphi_{\text{komp}} = 0,33$$

pak kompenzační výkon:

$$Q_C = 2328 \cdot (0,65 - 0,33) = 2328 \cdot 0,32 = \underline{\underline{745}} \text{ var}$$

Při porovnání potřebného kompenzačního výkonu Q_C s kompenzačním výkonem navrhovaného filtru Q_F je patrný větší kompenzační výkon filtru. Navrhovaný filtr bude tedy teoreticky dodávat do sítě kapacitní jalovou energii, která není žádoucí. Jelikož se však jedná o malé hodnoty výkonu, nebude mít tato kompenzace vliv na napájecí síť. Při testování navrženého filtru je potřeba zjistit, zda vyšší kapacitní jalový výkon nezpůsobí zvýšení jmenovitého napájecího napětí U_N .

V praxi se u těchto filtrů využívá dekompenzační člen, který dokáže řídit kompenzační výkon. Bývá proveden sériovým zapojením tlumivky s antiparalelně zapojenými tyristory (viz obr. 24). Jak již bylo uvedeno dříve, bylo v tomto návrhu upuštěno od fázově řízené tlumivky.

Další parametr, který je nutno sledovat nejen u filtrů harmonických, je frekvenční závislost reaktance kondenzátorů. Zapojením filtru na nelineární zátěž bude v případě výskytu harmonických proudů protékat kondenzátory i proud příslušný pro frekvenci naladěnou rezonančním obvodem. Jelikož zvyšováním frekvence se snižuje kapacitní reaktance, bude narůstat i proud kondenzátoru.

Pro navržený filtr je nejvyšší rezonanční kmitočet 550 Hz, tj. 11. harmonická, pro který bude mít daný kondenzátor reaktanci:

$$X_{C11} = \frac{1}{\omega_{11} \cdot C} = \frac{1}{3455,8 \cdot (32 \cdot 10^{-6})} = 9,04 \text{ } \Omega$$

Je patrný rozdíl vypočtených reaktancí pro 50 Hz a 550 Hz (99,47 Ω a 9,04 Ω). Pokud by obvodem protékaly harmonické vysokých hodnot, zvýší se proud kondenzátoru, dojde k ohřívání dielektrika a následné degradaci kondenzátoru. Tento stav má nepříznivý vliv na zatížení sítě mezi zdrojem a zapojeným kondenzátorem.

Řešením je použití kvalitnějších, frekvenčně odolnějších kondenzátorů, které jsou dnes již běžně v prodeji, avšak za vyšší pořizovací náklady.

..

Výpočet tlumivek

V navrhovaném filtru je zvolena hodnota veškerých kondenzátorů 32 μF/250 V a tím pádem je potřeba dopočítat hodnoty tlumivek pro uvedené frekvence příslušných harmonických. Pro výpočet hodnot tlumivek pak platí:

$$L = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \sqrt{C}} \right)^2$$

Hodnota L pro 3. harmonickou:

$$L_3 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \sqrt{C}} \right)^2 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 150 \sqrt{3,2 \cdot 10^{-5}}} \right)^2 = 35,2 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{35,2}} \text{ mH}$$

Hodnota L pro 5. harmonickou:

$$L_5 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \sqrt{C}} \right)^2 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 250 \sqrt{3,2 \cdot 10^{-5}}} \right)^2 = 12,6 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{12,6}} \text{ mH}$$

Hodnota L pro 7. harmonickou:

$$L_7 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \sqrt{C}} \right)^2 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 350 \sqrt{3,2 \cdot 10^{-5}}} \right)^2 = 6,4 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{6,4}} \text{ mH}$$

Hodnota L pro 9. harmonickou:

$$L_9 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \sqrt{C}} \right)^2 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 450 \sqrt{3,2 \cdot 10^{-5}}} \right)^2 = 3,9 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{3,9}} \text{ mH}$$

Hodnota L pro 11. harmonickou:

$$L_{11} = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \sqrt{C}} \right)^2 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 550 \sqrt{3,2 \cdot 10^{-5}}} \right)^2 = 2,6 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{2,6}} \text{ mH}$$

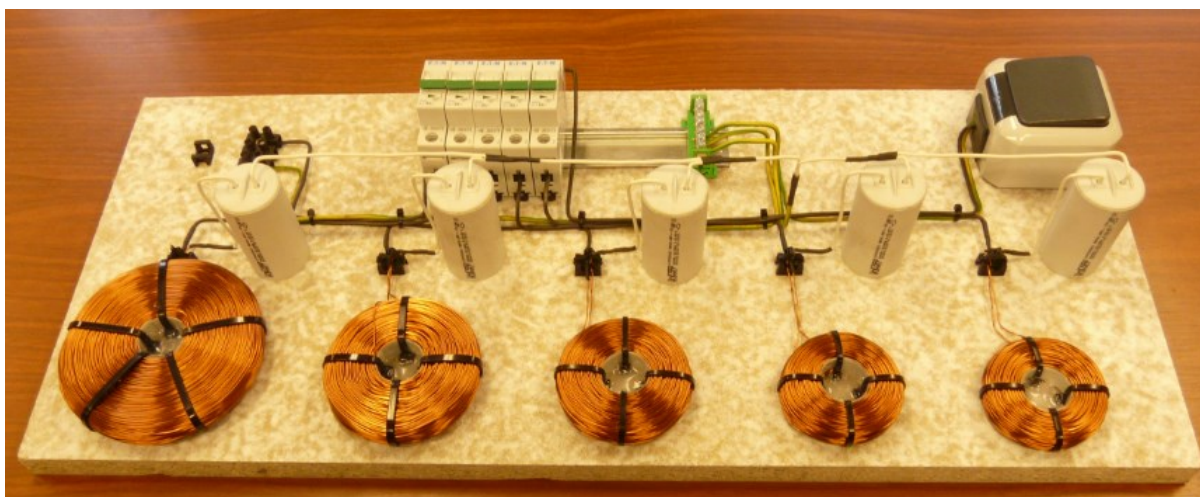
- **5. Vyhovuje filtr zadání?**

Tento typ filtru je v praxi běžně využíván pro filtrování THDI a THDU. Jelikož vypočtené hodnoty potřebných komponentů jsou běžné a konstrukčně realizovatelné, lze označit řešený filtr za vyhovující. Výpočty, které byly k filtru využity, však řeší pouze teoretickou stránku návrhu. Každý navrhovaný filtr je potřeba ověřit i po stránce praktické, aby bylo možné určit, zda filtr vyhovuje provozním podmínkám.

Z důvodu porovnání teoretické a praktické části návrhu se přistoupí k realizaci prototypu navrženého pasivního filtračního kompenzačního filtru.

- **6. Realizace prototypu a laboratorní ověření**

Pro realizaci filtru byly objednány kompenzační kondenzátory $32\ \mu\text{F}/250\ \text{V}$ o výkonu $400\ \text{var}$ a navinuty tlumivky dle vypočtených hodnot. Tlumivky byly navinuty měděným drátem o průřezu $0,95\ \text{mm}^2$. Z důvodu možného vzniku paralelních rezonancí mezi jednotlivými větvemi, bylo nutné umožnit tyto větve jednotlivě spínat (viz. kapitola 2.4.5). Původně řešené spínače, které jsou zakresleny ve schématu zapojení, byly z důvodu bezpečnosti nahrazeny jednofázovými jističi PL7-B6/1. Propojovací vodiče mezi jednotlivými komponenty byly měděné o průřezu $2,5\ \text{mm}^2$. Skutečné provedení realizovaného filtru je zobrazeno na obrázku níže.

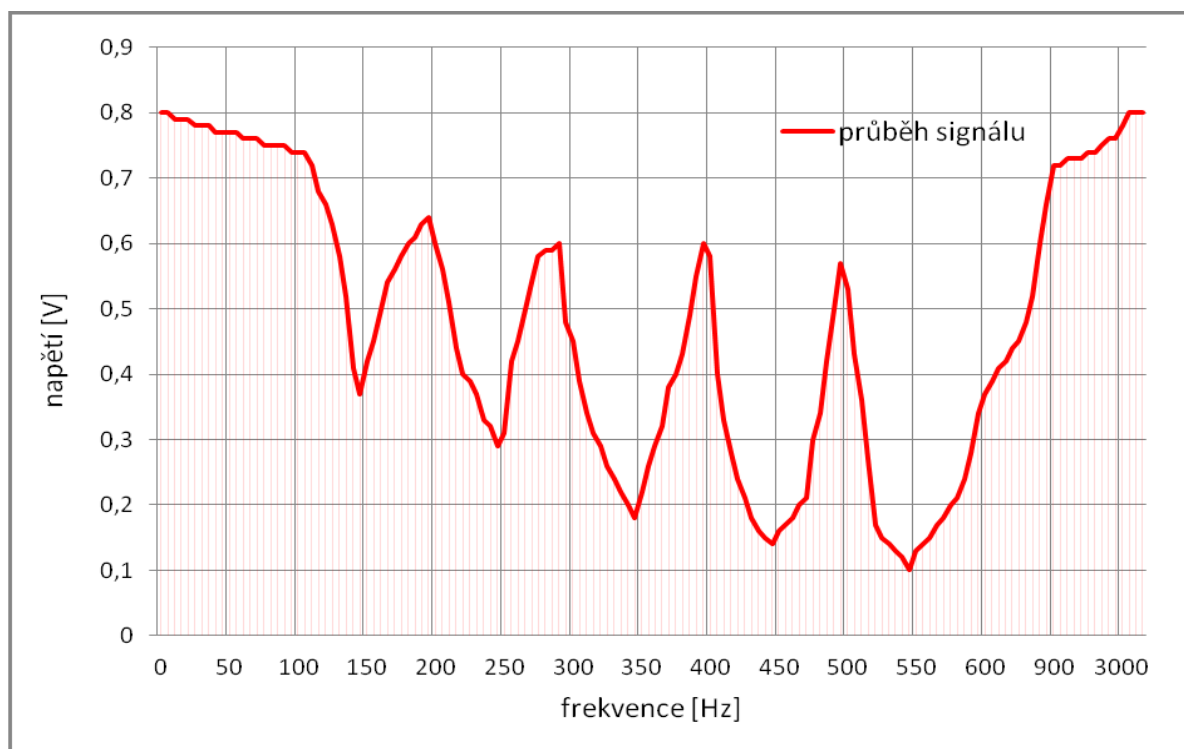


Obr. 54) prototyp navrženého filtru

Po dokončení výroby filtru, bylo provedeno měření frekvenční charakteristiky z důvodu ověření útlumů na jednotlivých navržených frekvencích. Vstupní sinusový signál byl generován z generátoru Metex MXG-9802 A a napěťová úroveň signálu byla $U = 0,8\ \text{V}$. Výstupní průběh na filtru byl monitorován osciloskopem Tektronix 222 PS a měřicím přístrojem Metex M-3890 USB.

Filtr byl testován ve frekvenčním rozsahu od 1 Hz do 4 kHz s měřicím krokem 10 Hz. Výsledky byly zaznamenávány do programu MS Excel a následně byl vytvořen výsledný průběh frekvenční charakteristiky (viz.obrázek níže). Výsledný průběh lze považovat za vyhovující, protože byl zaznamenán vždy útlum na požadovaných frekvencích pro 3., 5., 7., 9. a 11. harmonickou, neboli 150, 250, 350, 450 a 550 Hz.

Jako negativní parametr byl zaznamenán celkový útlum vstupního signálu generátoru Metex MXG-9802 A z hodnoty $U = 0,8$ V na hodnotu přibližně $U = 0,6$ V. Tato skutečnost byla způsobena vlastnostmi použitých komponentů a to především kondenzátorů. Jelikož byly použity kompenzační kondenzátory o velké kapacitě, byla reaktance kondenzátoru nízká (viz výpočet komponentů filtru), což se v praxi projevuje velkým proudem kondenzátoru. Tato nízká reaktance znamenala pro měřicí signálový generátor velkou zátěž, čímž se projevil pokles hodnoty vstupního signálu.



Obr. 55) změřená frekvenční charakteristika navrženého filtru

Aby byl ověřen skutečný vliv nízké reaktance kondenzátorů, byl filtr bez zátěže připojen na napájecí síť 230 V. Pro každou sekci byl změřen proud naprázdno. Hodnota proudu každé sekce dosahovala 2,4 A a tedy celým nezatíženým filtrem protékal proud naprázdno 12 A. Tento údaj byl blízký teoretickým výpočtům proudů kondenzátorů. Mírnému navýšení proudu přispěly zapojené tlumivky a již zmiňované parametry použitých komponentů L a C. Dle výpočtu lze použité kondenzátory zatížit proudem 2,08 A plus možné 30 % navýšení, tj. celková proudová zátěž 2,7 A.

Jednalo se tedy o hodnoty blízké povoleným maximálním hodnotám. Při testování filtru bylo z těchto důvodů sledováno i oteplení kondenzátorů, které však nikdy nepřesáhlo 30 °C. Protože prvořadým úkolem bylo odrušení harmonických a dle frekvenční charakteristiky filtr splňoval požadované útlumy, bylo pokračováno v dalším testování.

Parametry komponentů L a C, zapojené v sériovém rezonančním obvodu, mohly mít vliv i na vzrůst či pokles napájecího napětí v místě připojení filtru. Z těchto důvodů byly vždy sledovány hodnoty napájecího napětí v daných stavech. V průběhu celého testování byl zaznamenán pokles či zvýšení napájecího napětí pouze do tří desetin voltu.

Vyrobený prototyp filtru sice nedosahoval učebnicových hodnot, přesto bylo přistoupeno k praktickému měření parametrů filtru s nelineární zátěží v napájecí síti TÚ.

5.4. Měření napájecí sítě TÚ po aplikaci filtru harmonických

Měření bylo prováděno opět měřicím přístrojem ChauvinArnoux, C.A 8352 PowerQuality Monitor. Filtr byl zatížen UPS CS500, která napájela standardní PC HP 1730 a monitor HP Compaq DC 7700. Na této zátěži byly provedeny již předchozí měření, které poslouží k porovnání účinnosti filtrace harmonických a kompenzace účinníku.

Měření byly zjišťovány různé hodnoty harmonických proudů a napětí, účinníku, výkonu a napájecího napětí při různých variantách sepnutých filtračních sekcí. Jelikož se jednalo o velice obsáhlé měření, uvedeny budou pouze důležité výstupy z měření.

Po zapnutí jednotlivých sekcí nebo i všech sekcí filtru, byl zaznamenán pokles účinníku na hodnotu $\cos \varphi = 0,67$ respektive 0,63. Jelikož byly zvoleny velké hodnoty kapacit kondenzátorů a filtr byl připojen na nelineární zátěž, projevila se nízká hodnota kapacitní reaktance, čímž došlo k průtoku velkých hodnot proudů přes tlumivky. Toto mělo vliv na nárůst induktivní reaktance tlumivek, která způsobila pokles hodnot účinníku.

Pokud by byla potřeba kompenzovat tento účinník, bylo by nutné přepočítat hodnoty prvků filtru. Při zapnutí všech pěti filtračních sekcí a připojení zatížené UPS, protékal filtrem proud 12,5 A, při účinníku $\cos \varphi = 0,63$. Potřebný kompenzační výkon by pak vypadal následovně:

$$P = U_N \cdot I_Z \cdot \cos \varphi = 230 \cdot 12,5 \cdot 0,63 = 1811 \text{ W}$$

a $\tan \varphi$:

$$\cos \varphi = 0,63 \rightarrow \varphi = 50,94 \rightarrow \tan \varphi = 1,23$$

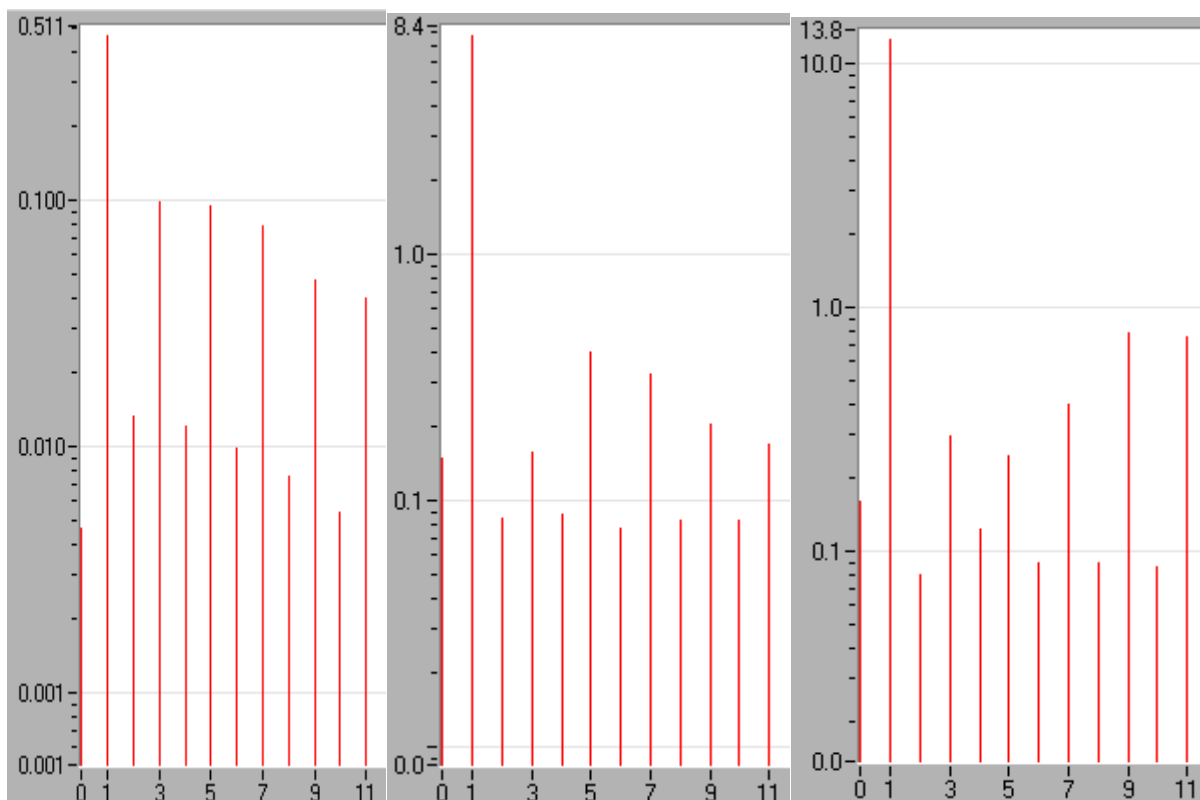
$$\cos \varphi_{komp} = 0,95 \rightarrow \varphi_{komp} = 18,19 \rightarrow \operatorname{tg} \varphi_{komp} = 0,33$$

pak kompenzační výkon:

$$Q_C = 1811 \cdot (1,23 - 0,33) = 1811 \cdot 0,9 = \underline{\underline{1630}} \text{ var}$$

Při rozboru výsledku naměřených hodnot harmonických proudů a napětí, byla zjištěna funkčnost filtru a vliv spínání jednotlivých sekcí filtru na průběhy harmonických. Pro lepší názornost jsou nejdůležitější výsledné hodnoty vloženy do tabulek a vyneseny do grafů.

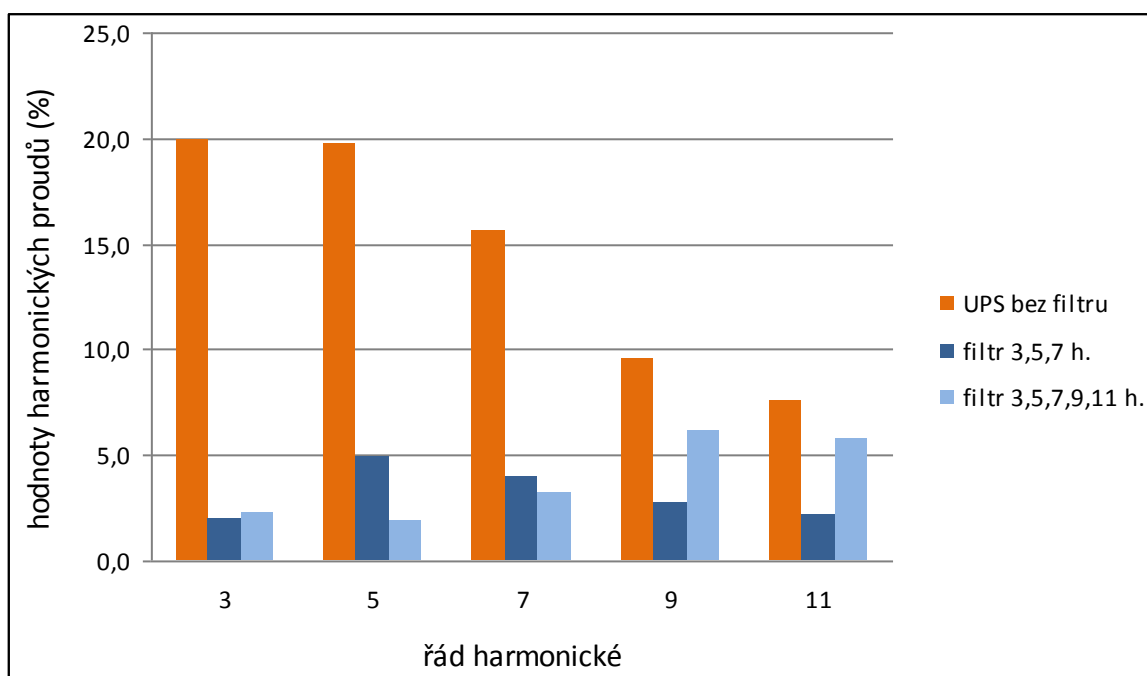
V první části je zobrazeno porovnání harmonických proudů. Spektrální analýza je provedena pro harmonické proudy zatížené UPS bez filtru harmonických, zatížené UPS s filtrem při zapnutí 3., 5. a 7. sekce a zatížené UPS s filtrem při zapnutí veškerých sekcí. Pro porovnání byly vybrány právě tyto měření, jelikož zde byl viditelný největší rozdíl naměřených hodnot. Přepočtené procentuální hodnoty v tabulce jsou vztaženy vždy k základní harmonické daného odběru. Pro harmonické proudy byl odběr samostatné zatížené UPS 0,5 A. Pro UPS se zapojeným filtrem sekcí 3., 5., a 7. harmonické byl odběr proudu 7,7 A. Pro zapojené veškeré sekce filtru s UPS byl odběr proudu 12,5 A.



Obr. 56) spektrální analýza harmonických proudů pro UPS bez filtru, UPS s filtrem při zapnutí 3., 5., 7. sekce filtru a UPS s filtrem při zapnutí veškerých sekcí filtr

Tab. 3) hodnoty harmonických proudů na UPS (přepočteno k základní harmonické)

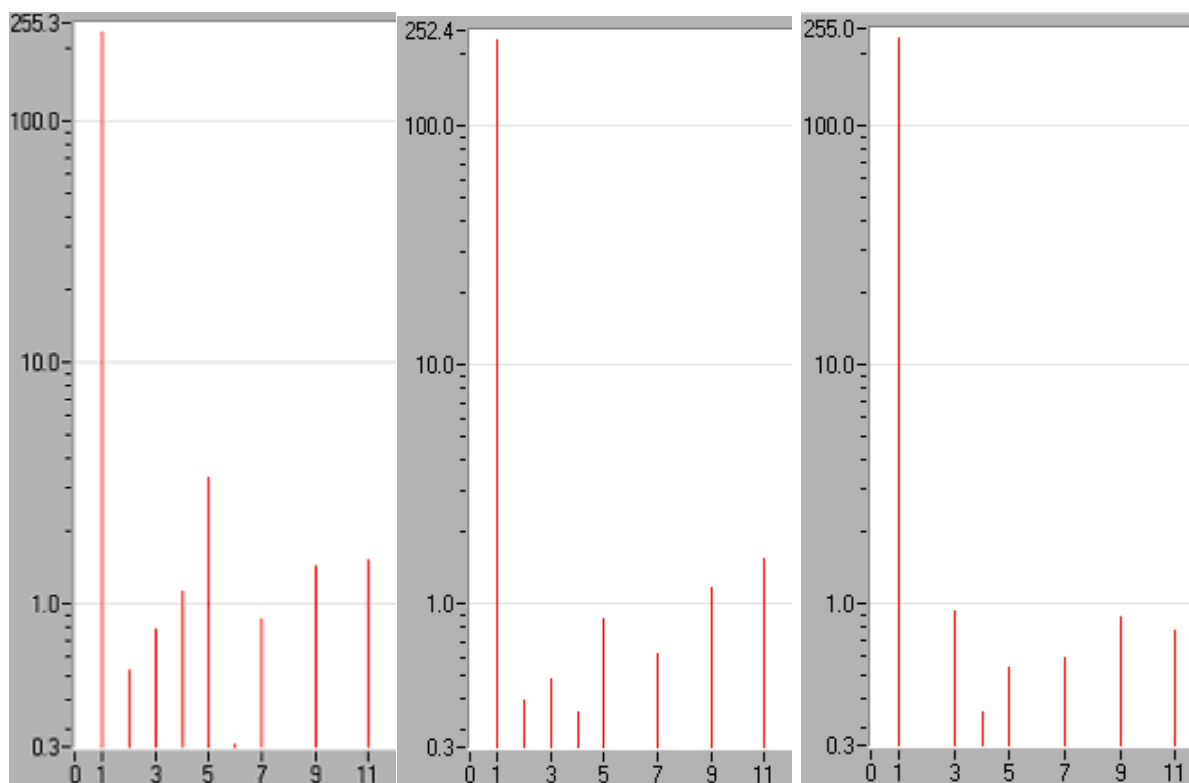
Hodnoty harmonických proudů (%)			
řád harmonické	UPS bez filtru (%)	UPS + 3,5,7 sekce filtru (%)	UPS + veškeré sekce filtru (%)
3	20,0	2,0	2,3
5	19,8	4,9	1,9
7	15,6	4,0	3,2
9	9,6	2,7	6,2
11	7,6	2,2	5,8



Obr. 57) zobrazení harmonických proudů na UPS

Dle uvedených výsledků měření harmonických proudů, je patrný vliv navrženého filtru na snížení hodnot harmonických ve všech řešených řádech. Tímto byla dokázána funkčnost odrušovacího filtru. Z výsledků však vyplývá, že při zapnutí veškerých sekcí filtru, došlo k nárůstu harmonických proudů v řádech 9 a 11. Při zapnutí filtru pouze pro 3., 5. a 7. harmonickou, dosahovaly hodnoty pro 9. a 11. harmonickou nižších hodnot. Tento stav byl způsoben paralelní rezonancí mezi navrženými sériovými rezonančními obvody.

Ve druhé části je zobrazeno porovnání harmonických napětí. Spektrální analýza je provedena opět pro harmonické napětí zatížené UPS bez filtru harmonických, zatížené UPS s filtrem při zapnutí 3., 5. a 7. sekce a zatížené UPS s filtrem při zapnutí veškerých sekcí. Pro přepočet hodnot harmonických napětí se vycházelo ze základní harmonické o hodnotě $U = 230 \text{ V}$.



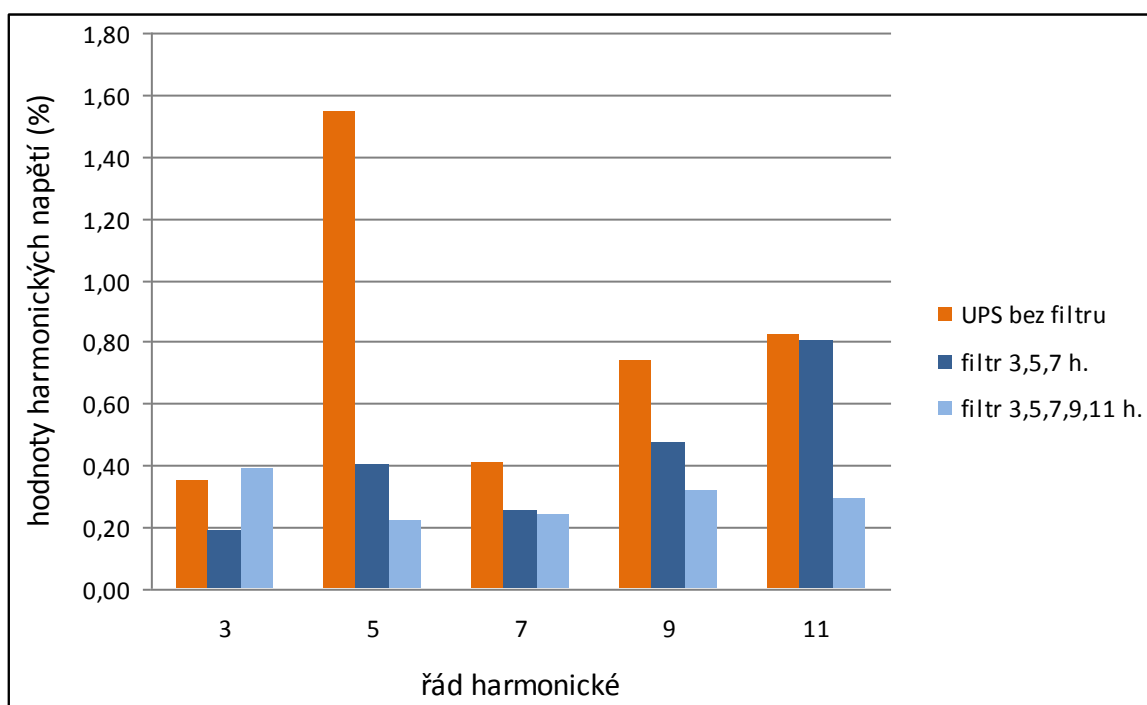
Obr. 58) spektrální analýza harmonických napětí pro UPS bez filtru, UPS s filtrem při zapnutí 3., 5., 7. sekce filtru a UPS s filtrem při zapnutí veškerých sekcí filtru

Proti měření harmonických proudů se u měření harmonických napětí projevil vždy útlum na frekvencích, které byly danou sekcí rušeny. Viditelný je rozdíl právě u sekcí 9. a 11. harmonické. I pro další kombinace spínání se vždy projevil útlumu na právě sepnuté sekci filtru.

Po dobu celého měření harmonických napětí nedocházelo k výraznému snížení a ani navýšení napájecího napětí. Pokud existoval nějaký výkyv, byl vždy do tří desetin voltu.

Tab. 4) hodnoty harmonických napětí na UPS (přepočteno k základní harmonické)

Hodnoty harmonických napětí (%)			
řád harmonické	UPS bez filtru (%)	UPS + 3,5,7 sekce filtru (%)	UPS + veškeré sekce filtru (%)
3	0,35	0,39	0,19
5	1,55	0,22	0,40
7	0,41	0,24	0,25
9	0,74	0,32	0,47
11	0,82	0,29	0,80



Obr. 59) zobrazení harmonických napětí na UPS

Při testování filtru byl řešen i vliv měniče UPS CS500 na LCD monitor, který byl připojen ve společném napájecím uzlu. Pokud byl filtr vypnutý a do napájecí sítě se dostávalo rušení z UPS, bylo viditelné blikání displeje monitoru. Po zapnutí již 3. a 5. sekce filtru, bylo blikání téměř nepostřehnutelné. V případě zapojení sekcí 3., 5. a 7. harmonické, nebylo znatelné již žádné kolísání obrazu. Byly vyzkoušeny i varianty se zapnutím různých kombinací sekcí filtru, avšak nejlépe vyhovovaly výsledky při filtrování nižších řádů harmonických.

Vyrobením filtru bylo prokázáno, že lze tímto způsobem řešit snížení THDI a THDU. Jako negativní stránka se však projevil nárůst odebíraného proudu filtrem. Pokud bychom řešili tímto způsobem odrušování napájecí sítě TÚ, byla by spotřeba elektrické energie samostatných filtrů vyšší, nežli současná spotřeba zatížených veškerých UPS. Snížení spotřeby lze samozřejmě realizovat snížením hodnot kapacit kondenzátorů, avšak na úkor zvyšování hodnot indukčností tlumivek.

Problémem záložních UPS je i široké spektrum harmonických pocházející z měničů. Tyto vyšší harmonické frekvence nejsou ideální pro použité kondenzátory ve filtrech, protože mají vliv na zkracování životnosti kondenzátorů a celkové parametry filtru.

Dalším problémem, kterým bychom se museli zabývat při realizaci navrženého filtru, je postupné spínání jednotlivých sekcí. Jak již bylo dříve zmíněno, řeší se z důvodu vzniku paralelních rezonancí mezi jednotlivými sekcemi. Spínání se provádí vždy od sekce nastavené na nejnižší rezonanční frekvenci po sekci s nejvyšší frekvencí. Vypínání je prováděno od sekce laděné na nejvyšší frekvenci po nejnižší. Tuto realizaci lze provést např. ovládáním stykačů prostřednictvím naprogramovaného PIC obvodu.

Při praktických realizacích filtračně kompenzačních filtrů, je do sériového rezonančního obvodu zařazován i odpor, který zabezpečuje snižování proudových rázů při spínání jednotlivých sekcí. Dále je tento odpor využíván pro snížení hodnot proudu v případě poruchy na jednotlivých prvcích dané sekce.

6. Ekonomické zhodnocení navržených variant

Navržený prototyp pasivního filtračně kompenzačního filtru, byl z důvodu neznalosti problematiky návrhů těchto filtrů řešen pouze pro UPS malého výkonu. Jednalo se o jednofázovou UPS CS500, která dosahuje maximálního výkonu 300 W. Navržené komponenty tedy mohly být dimenzovány na malé hodnoty proudu a jmenovité napětí 230 V.

Pro praktický návrh byly zakoupeny kondenzátory, které jsou běžně dostupné např. pro zářivková svítidla. Jejich parametry jsou však pro návrh výkonnějších filtrů nedostatečné, ať již po stránce zatížitelnosti či jakostní. Použité vzduchové tlumivky byly provedeny ne zcela profesionálním ručním navíjením, čímž nedosahovaly potřebných hodnot. Především nesprávné kladení jednotlivých závitů, mohlo mít velký vliv na výslednou indukčnost a mezizávitovou kapacitu.

Zanedbání těchto výše uvedených skutečností umožnilo provést výrobu filtru za relativně malé finanční prostředky. Pokud bychom realizovali výrobu filtrů pro odrušení napájecí sítě na TÚ, bylo by nutné instalovat několik těchto filtrů. Jelikož odrušení harmonických je nejlépe provádět přímo u zdroje rušení, nepostačoval by pro tuto napájecí síť pouze jeden filtr. V této napájecí síti by se jednalo nejméně o čtyři výkonné filtry. Jeden pro hlavní UPS na sále telekomunikačních systémů a tři pro 3x UPS v hlavní serverovně. Tuto realizaci by nebylo vhodné již řešit svépomocí, jelikož návrh, výroba prototypu, testování, návrh řídicí elektroniky a další kroky spojené s vlastní výrobou, by nebyly jistě efektivní jak po stránce ekonomické, tak odborné.

Jak již však bylo uvedeno v předchozí kapitole, negativní vlastností tohoto filtru je velký odebíraný proud. Pro instalované UPS systémy na TÚ, by nebylo tedy vhodné řešit odrušení THDI a THDU tímto způsobem. Tyto filtry je vhodné využít spíše pro napájecí síť s velkými odběry.

Použitím tohoto filtru se však zjistilo, že snížení THDI a THDU na testované UPS, se pozitivně projevilo na odstranění některých nežádoucích rušivých vlivů. Jakékoliv řešení na snížení THDI a THDU v napájecí síti TÚ, by tedy bylo vhodné.

Snížení vlivu harmonických na napájecí síť lze také řešit obměnou stávajících kabelových rozvodů v objektu TÚ. Takto lze docílit „tvrdosti“ napájecí sítě pro veškerá přípojná místa. Dojde tím k odlehčení středního vodiče jednofázových rozvodů, s možným efektem na snížení vlivu harmonických v napájecí síti řešeného objektu. Realizace rekonstrukce kabelových rozvodů objektu TÚ, je dle předběžného rozpočtu vyčíslena na 90 tis. Kč.

Dalším možným způsobem odrušení napájecí sítě, je využití aktivních filtrů. Problémem, který opět nastává, je nízký odběr elektrické energie záložními systémy UPS. Pro získání cenové nabídky na realizaci aktivních filtrů, bylo osloveno celkem šest dodavatelských společností. Jediná

společnost Janitza Electronics, byla ochotna dodat aktivní odrušovací filtr pro nízkoodběrová zařízení. Jednalo se o třífázový, 10 A aktivní filtr a celková cena byla stanovena na 110 tis. Kč. Ostatní oslovené společnosti uvedli, že se zabývají pouze průmyslovými aplikacemi, kde odebírané proudy přesahují 200 A.

Obě navrhovaná řešení, jsou však pouze teoretická a skutečná realizace by v konečné fázi nemusela splnit očekávání. Je tedy na zvážení, zda některý z uvedených návrhů skutečně provést. V případě pozitivních výsledků po realizaci jakéhokoliv řešení, by výsledným efektem jistě bylo snížení nákladů na vyskytující se poruchy u nezálohovaných zařízení a zefektivnění činností při seřizování a kalibracích různých elektronických systémů. Vzhledem však k nutným investicím a bez znalosti výsledného stavu, je ekonomická stránka navrhovaných řešení sporná.

7. Závěr

O obor elektromagnetická kompatibilita, respektive rušení harmonickými řády, jsem se zajímal již před nástupem na VŠB TU Ostrava. Jelikož zvolený studijní program elektroenergetika se touto vědní oblastí zabýval jen okrajově, jsem velice rád za některé nové informace získané při studiu. Tyto nové poznatky mi pomohly při rozhodování o sepsání diplomové práce na téma harmonických v napájecí síti mého pracoviště, tedy TÚ Dolů Bílina. Jelikož během studia jsem získával informace o možném řešení snížení rušení prostřednictvím pasivních filtrů, zajímala mě praktická realizovatelnost a funkčnost těchto odrušovacích filtrů.

Psaním teoretické části diplomové práce jsem zjistil rozsáhlost problematiky EMC a především možnost získání velkého množství odborných zdrojů k této problematice. Provést výtah alespoň nejdůležitějších částí tohoto oboru, se podepsal i na rozsahu této diplomové práce. V získaných textech jsou uvedeny informace, na kterých lze stavět a staví se samostatné vědecké výzkumy. S rychlostí rozvoje spotřební elektroniky a elektronických systémů, bude obor EMC i do budoucna důležitým vědním oborem.

Profesně se řadím spíše do oblasti slaboproudé elektroniky a již mám zkušenost s praktickou realizací odrušovacích prvků a pásmových filtrů v oblasti vyšších frekvencí. Pro frekvence blízké napájecí síti, byla realizace odrušovacího filtru zcela nová praxe. První návrh filtru, uvedený v této diplomové práci, byl především z důvodu vypočtených hodnot prvků nerealizovatelný a bylo přistoupeno k návrhu již v praxi využívanému filtračně kompenzačnímu filtru.

Teoretické výpočty byly ověřeny na reálném prototypu tohoto filtru. Dá se říci, že teorie byla blízká praktické realizaci. Prováděné měření frekvenční charakteristiky a spektrální analýza harmonických průběhů, byla vzhledem k prvnímu prototypu filtru uspokojivá. Avšak pro skutečné využití v napájecí síti TÚ, nešlo navržený filtr využívat. Jedním z důvodů byl odběr elektrické energie nezatíženého filtru, který několikanásobně překračoval odběr testované zatížené UPS. Jelikož pro praktické využití by byly potřebné čtyři tyto filtry, došlo by k velkému navýšení odběru elektrické energie, vzhledem k celkovému odběru všech zatížených UPS v napájecí síti TÚ. Dalším problémem je i velmi velký výskyt harmonických vyšších řádů vznikající v měničích UPS systémů, pro které je vhodnější filtrace pomocí aktivních filtrů. Ekonomická stránka návrhů řešení odrušení napájecí sítě TÚ, je uvedena v kapitole č. 6, Ekonomické zhodnocení navržených variant.

Závěrem bych rád uvedl, že i vzhledem k nerealizovatelnosti navrženého prototypu pasivního odrušovacího filtru, mi jak praktická, tak teoretická část řešené problematiky v této diplomové práci, poskytla nové důležité informace pro mou další profesní činnost.

Použitá literatura:

- [A] Bc. Jan Zelenka, UPS a záložní zdroje s využitím v telekomunikacích SD a.s., Bakalářská práce, VŠB TU Ostrava, 2012
- [B] Prof. Ing. Jiří Svačina, CSc., Základy elektromagnetické kompatibility, Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav radiotechniky, 2005
- [C] Prof. Ing. Dobroslav Kováč, CSc.; doc. Ing. Irena Kováčová, CSc., Ing. Ján Kaňuch, PhD., EMC z hlediska teorie a aplikace, Nakladatelství BEN, Praha 2006
- [D] EMC (on-line 20.10.2013) dostupné z WWW: www.fce.vutbr.cz-tst-rada.cz
- [E] Ing. Polina Vaculíková, CSc. A spol., Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů, GRADA Publishing, 1998
- [F] David Chapman, Harmonické – Příčiny a účinky, CopperDevelopmentAssociation, Velká Británie.
Překlad Josef Gavlas, Miloslav Kužela, Pavel Santarius, FEI Technická univerzita Ostrava
- [G] Encyklopedie EMC (on-line 24.1.2014) dostupné z WWW: www.radio.feec.vutbr.cz
- [H] UPS zdroje pro systémy střídavého zajištění napájení, sborník přednášek, H.V.K.L. Propag Team Trutnov, 1997
- [CH] Bc. Marek Havrda, Omezování elektromagnetických emisí – Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2012
- [I] doc. Dr. Ing. Gurecký Jiří, Elektronické texty FEI VŠB-TU Ostrava, texty k předmětu Elektroenergetika
- [J] doc. Ing. Václav Kůs, CSc., Nízkofrekvenční rušení, Západočeská univerzita v Plzni, 2003
- [K] Prof. Ing. Pavel Santarius, CSc., Elektromagnetická kompatibilita, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2007
- [L] Impedance (on-line 23.3.2014) dostupné z WWW: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Impedance_FKZ.GIF
- [M] doc. Ing. Václav Kůs, CSc., Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu, BEN – technická literatura, Praha 2002